

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Cibele Nogueira Paiva

A RELEVÂNCIA DO FATOR HUMANO NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. José Arnaldo Barra Montevechi.

Dezembro de 2010

Itajubá - MG

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me amparar nos momentos difíceis e por me dar força interior para superar as dificuldades em cada momento da minha vida.

Em especial, dedico cada conquista e cada superação ao meu pai, meu grande exemplo, que estará sempre presente na minha vida, me guiando e iluminando meus caminhos.

Agradeço a minha querida mãe e aos meus irmãos, por acreditarem em mim e por me apoiarem todos os dias.

Agradeço ao Fer, o amor da minha vida, que sempre presente, me apoiou não só nessa conquista, mas na maior parte das decisões importantes da minha vida.

Agradeço ao meu orientador, Zé Arnaldo, antes de tudo pela amizade conquistada, e, além disso, pelo exemplo e pelo incentivo sempre.

Agradeço também ao Leandro, pela dedicação e comprometimento, dedicando fins de semana e turnos da madrugada para que fosse possível a conclusão deste trabalho.

Gostaria de agradecer ao professor Fabiano, por todas suas contribuições, que sem dúvida foram fundamentais para a realização desse trabalho.

Agradeço também ao Júnior, que também me ajudou bastante para a realização deste trabalho, dedicando-se também nos turnos da madrugada.

Agradeço ainda a todos meus amigos da UNIFEI que me acompanharam ao longo desses anos, pela amizade, compreensão e pelos conselhos.

Por fim, agradeço ao CNPq, ao Programa de Pró-Engenharia da CAPES e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo suporte ao longo dessa pesquisa.

“Se você quer ser bem sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si”.

Ayrton Senna

RESUMO

A simulação computacional a eventos discretos tem sido bastante utilizada para análises de sistemas complexos de manufatura. Contudo, tem se observado que o elemento humano não tem sido corretamente representado, pois este pode apresentar variações naturais em seu desempenho, o que pode gerar diferenças significativas entre os resultados previstos pelos modelos de simulação e os resultados obtidos no sistema real. Baseado neste contexto, o primeiro objetivo desta pesquisa foi identificar como inserir fatores humanos em um modelo de simulação a eventos discretos. Posteriormente, o segundo objetivo foi analisar se a incorporação de fatores humanos em um modelo de simulação altera a qualidade dos resultados previstos pelo modelo sem a incorporação desses fatores. Para atingir aos objetivos apresentados, um estudo de simulação foi conduzido em uma linha de montagem com elevado número de atividades manuais, onde se propôs incorporar ao modelo de simulação dois fatores humanos que poderiam influenciar o desempenho do trabalhador: o trabalho em turnos e o ritmo circadiano. O método de pesquisa utilizado para a condução desta pesquisa foi a modelagem e simulação, composto por três fases: concepção, implementação e análise. De posse dos dados coletados na cronoanálise, realizada em quatro períodos durante cada turno de trabalho, estes foram adicionados ao modelo, o que resultou na alteração do tempo padrão considerado pela equipe da engenharia. Assim, foi possível avaliar a variabilidade ocorrida devido ao ritmo circadiano e também devido à mudança de turnos, através dos totais produzidos resultantes nos sete modelos de simulação (cenários) desenvolvidos nesta pesquisa. Os resultados obtidos a partir dos testes de hipóteses mostraram que a consideração dos dois fatores é significativa quando comparados com o modelo da engenharia, que considerou os tempos de processamento coletados dentro do laboratório. Além disso, foi possível verificar a diferença ocorrida no total produzido quando considerados períodos diferentes durante os turnos de trabalho e também entre turnos. Conclui-se que a consideração do fator humano é significativa para construção de um modelo de simulação já que o desempenho do trabalhador é influenciado pela sua capacidade, formação, educação, ambiente físico e organizacional juntamente com suas características fisiológicas e psicológicas.

Palavras-chaves: *Simulação computacional; Fator humano; Ritmo circadiano; Trabalho em turnos.*

ABSTRACT

The discrete event simulation has been widely used for analysis of complex manufacturing systems. However, it has been observed that the human element has not been properly represented, since this may have natural variations in their performance, which can generate significant differences between the results predicted by the models and simulation results obtained in the real system. Based on this context, the first objective of this research was to identify how to insert human factors in a model of discrete event simulation. Subsequently, the second objective was to examine whether the incorporation of human factors in a simulation model changes the quality of the results predicted by the model without the incorporation of these factors. To achieve the goals presented, a simulation study was conducted on an assembly line with a high number of manual activities, which incorporate the proposed simulation model, two human factors that could influence the performance of workers: the shift work and circadian rhythm. The research method used for conducting this research was the modeling and simulation, composed of three phases: design, implementation and analysis. By having the data collected in Cronoanalysis conducted in four periods during each work shift, these were added to the model, which resulted in changing the default time considered by the engineering team. Thus it was possible to assess the variability occurred due to circadian rhythm and also due to the change of shifts, produced by the resulting total in the seven simulation models (scenarios) developed in this research. The results from the hypothesis tests show that the consideration of both factors is significant when compared with the engineering model, which considered the processing times collected in the laboratory. Furthermore, we observed a difference in the total yield occurred when considered over different periods during the work shifts and between shifts. It is concluded that consideration of the human factor is significant for building a simulation model since the employee's performance is influenced by their ability, training, education, physical and organizational environment along with physiological and psychological characteristics.

Key-words: *Computer simulation; Human factor; Circadian rhythm; Shift work.*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Objetivos da pesquisa	3
1.3 Relevância da pesquisa	3
1.4 Estrutura da Dissertação.....	4
2. MÉTODO DE PESQUISA.....	6
2.1 Considerações iniciais.....	6
2.2 Classificação da pesquisa.....	6
2.3 Método de pesquisa quantitativo: modelagem e simulação	8
2.4 Etapas para o desenvolvimento de uma pesquisa de modelagem e simulação	15
2.5 Etapas para o desenvolvimento de um modelo de desempenho humano	20
2.6 Justificativa para utilização da Simulação Computacional.....	22
2.7 Considerações finais	22
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
3.1 Considerações iniciais.....	24
3.2 Modelagem e Simulação.....	24
3.2.1 Considerações iniciais.....	24
3.2.2 Conceitos e definições.....	26
3.2.2.1 Simulação.....	26
3.2.2.2 Simulação a eventos discretos.....	26
3.2.2.3 Sistema.....	27
3.2.2.4 Modelo.....	27
3.2.2.5 Variáveis.....	28
3.2.2.6 Elementos.....	29
3.2.2.7 Simulação termitante e não termitante.....	30
3.2.3 Vantagens da Simulação Computacional.....	30
3.2.4 Desvantagens da Simulação Computacional.....	33
3.2.5 Validação, Verificação e Credibilidade.....	34
3.2.6 Limitações da Simulação Computacional.....	41
3.3 Aplicação da Simulação em um sistema de manufatura.....	44
3.4 Consideração do fator humano nos modelos de simulação.....	45

3.4.1	Considerações iniciais.....	45
3.4.2	Desenvolvimento da Modelagem Humana	48
3.4.3	Identificação dos fatores humanos	49
3.4.4	Trabalho em turnos.....	60
3.4.5	Modelos de desempenho humano.....	63
3.4.5.1	Teoria do desempenho relacionada ao ritmo circadiano.....	64
3.4.5.2	Teoria do desempenho relacionada à idade.....	65
3.4.5.3	Teoria do desempenho relacionado à aprendizagem e fadiga.....	67
3.5	Considerações finais.....	68
4.	APLICAÇÃO DO MÉTODO	70
4.1	Considerações iniciais.....	70
4.2	Concepção	70
4.3	Implementação.....	95
4.4	Análise	116
4.5	Considerações finais.....	143
5.	CONCLUSÕES	145
5.1	Conclusões e contribuições da pesquisa.....	145
5.2	Recomendações para trabalhos futuros.....	147
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148
	ANEXO A - Artigos gerados a partir desta pesquisa.....	154

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de pesquisas científicas.....	6
Figura 2.2 - Classificação da pesquisa quantitativa.....	8
Figura 2.3 - Modelo de pesquisa para simulação.....	12
Figura 2.4 - Etapas de um projeto de simulação.....	15
Figura 2.5 - Fases de um projeto de simulação, com destaque para a modelagem dos dados de entrada, desenvolvida nesta pesquisa de forma detalhada.....	19
Figura 2.6 - Etapas para a seleção dos Modelos de Desempenho humano.....	20
Figura 3.1 - Validação do modelo conceitual e validação operacional.....	39
Figura 3.2 - Folga entre o resultado do sistema real e o resultado da simulação.....	42
Figura 3.3 - Definição de um sistema complexo.....	45
Figura 3.4 - Variação no tempo de ciclo em uma estação de trabalho manual.....	47
Figura 3.5 - Modelagem do desempenho humano como um auxílio no projeto dos sistemas de manufatura.....	48
Figura 3.6 - Teoria da personalidade dinâmica.....	55
Figura 3.7 - Quadro teórico da modelagem do desempenho humano.....	59
Figura 3.8 - Modelo de KNUTSSON.....	62
Figura 3.9 - Modelo de desempenho humano relacionado ao ritmo circadiano.....	65
Figura 3.10 - Modelo de desempenho humano relacionado à idade.....	67
Figura 4.1 - Folha de trabalho padronizado do processo em estudo.....	74
Figura 4.2 - Modelo conceitual do processo em estudo (IDEF-SIM Fluxo contínuo).....	75
Figura 4.3 - Modelo conceitual do processo em estudo (Mapa IDEF-SIM).....	76
Figura 4.4 - Controle 17 da Montagem.....	83
Figura 4.5 - Controle 17 do KIT.....	83
Figura 4.6 - Controle 17 do Teste e Embalagem.....	84
Figura 4.7 - Tela de <i>Processing</i>	86
Figura 4.8 - Tela de Arquivos Externos.....	86
Figura 4.9 - Tela de apresentação da <i>Entity Location</i>	87
Figura 4.10 - Tela de Macros.....	92
Figura 4.11 - Exemplo da lógica <i>Call Hour</i>	93
Figura 4.12 - Exemplo da Sub-rotina.....	95
Figura 4.13 - Modelo computacional do sistema.....	102

Figura 4.14 - Tela de <i>Processing</i> do Modelo Computacional.....	104
Figura 4.15 - Controle 17 para Validação.....	105
Figura 4.16 - Quadro de Contadores do Modelo Computacional.....	107
Figura 4.17 - Teste de Normalidade: Peças/Hora produzidas pelo Sistema Real.....	114
Figura 4.18 - Teste de Normalidade: Peças/Hora produzidas pelo Modelo.....	115
Figura 4.19 - Teste F: Peças/Hora produzidas pelo Sistema Real X Peças/Hora geradas pelo Modelo.....	115
Figura 4.20 - Variabilidade do tempo de processamento - Primeiro Turno.....	124
Figura 4.21 - Variabilidade do tempo de processamento - Segundo Turno.....	124
Figura 4.22 - Comparação entre os totais produzidos do Cenário 01 e Cenário 02.....	126
Figura 4.23 - Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 03 do Primeiro Turno.....	126
Figura 4.24 - Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 04 do Primeiro Turno.....	127
Figura 4.25 - Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 05 do Primeiro Turno.....	128
Figura 4.26 - Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 06 do Primeiro Turno.....	128
Figura 4.27 - Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 07 do Primeiro Turno.....	129
Figura 4.28 - Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 03 do Segundo Turno.....	130
Figura 4.29 - Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 04 do Segundo Turno.....	131
Figura 4.30 - Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 05 do Segundo Turno.....	131
Figura 4.31 - Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 06 do Segundo Turno.....	132
Figura 4.32 - Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 07 do Segundo Turno.....	133
Figura 4.33 - Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e os Cenários 03 dos Primeiro e Segundo Turnos.....	134
Figura 4.34 - Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e os Cenários 04 dos Primeiro e Segundo Turnos.....	134

Figura 4.35 - Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e os Cenários 05 dos Primeiro e Segundo Turnos.....	135
Figura 4.36 - Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e os Cenários 06 dos Primeiro e Segundo Turnos.....	136
Figura 4.37 - Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e os Cenários 07 dos Primeiro e Segundo Turnos.....	136
Figura 4.38 - Resultado do <i>Mood Median Test</i> gerado pelo Minitab.....	141
Figura 4.39 - Resultado do <i>Mood Median Test</i> em forma de gráfico.....	142

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - <i>Softwares</i> de Simulação a eventos discretos.....	25
Tabela 3.2a - Quadro teórico relacionado ao desempenho e fator humano.....	50
Tabela 3.2b - Quadro teórico relacionado ao desempenho e fator humano.....	51
Tabela 3.3a - Seleção dos fatores humanos chaves que afetam o desempenho humano.....	56
Tabela 3.3b - Seleção dos fatores humanos chaves que afetam o desempenho humano.....	57
Tabela 4.1 - Simbologia utilizada na técnica IDEF-SIM.....	72
Tabela 4.2 - Tempos de processamento coletados pelo Laboratório de Estudo de Tempos & Métodos.....	82
Tabela 4.3 - Horários de coleta dos dados.....	85
Tabela 4.4 - Distribuição para os tempos de processamento coletados no Primeiro Período do Primeiro Turno.....	88
Tabela 4.5 - Distribuição para os tempos de processamento coletados no Segundo Período do Primeiro Turno.....	89
Tabela 4.6 - Distribuição para os tempos de processamento coletados no Terceiro Período do Primeiro Turno.....	89
Tabela 4.7 - Distribuição para os tempos de processamento coletados no Quarto Período do Primeiro Turno.....	90
Tabela 4.8 - Distribuição para os tempos de processamento coletados no Primeiro Período do Segundo Turno.....	90
Tabela 4.9 - Distribuição para os tempos de processamento coletados no Segundo Período do Segundo Turno.....	91
Tabela 4.10 - Distribuição para os tempos de processamento coletados no Terceiro Período do Segundo Turno.....	91
Tabela 4.11 - Distribuição para os tempos de processamento coletados no Quarto Período do Segundo Turno.....	92
Tabela 4.12 - Informações sobre os produtos.....	98
Tabela 4.13 - Quantidade de postos de trabalho da linha em estudo.....	99
Tabela 4.14 - Resultados gerados pelo modelo de validação.....	106
Tabela 4.15a - Tempos de processamento da Cronoanálise para os quatro períodos (tempos em seg).....	108

Tabela 4.15b - Tempos de processamento da Cronoanálise para os quatro períodos (tempos em seg).....	109
Tabela 4.15c - Tempos de processamento da Cronoanálise para os quatro períodos (tempos em seg).....	110
Tabela 4.16 - Resultados do Teste de Normalidade para o Primeiro Turno.....	111
Tabela 4.17 - Distribuição e Parâmetros dos dados da cronoanálise do primeiro turno - Modelo para Validação.....	112
Tabela 4.18 - Total produzido por hora pelo modelo e pelo sistema real.....	113
Tabela 4.19 - Resultados do Teste de Normalidade para os dados de produção.....	114
Tabela 4.20 - Resultados do Teste <i>2 Sample T</i>	116
Tabela 4.21 - Descrição dos Cenários.....	117
Tabela 4.22 - Total produzido pelo Cenário 01.....	118
Tabela 4.23 - Resultados dos experimentos gerados pelo Promodel – Primeiro Turno.....	120
Tabela 4.24 - Resultados dos experimentos gerados pelo Promodel – Segundo Turno.....	122
Tabela 4.25 - Resultados dos Testes de Hipóteses do Primeiro Turno.....	138
Tabela 4.26 - Resultados dos Testes de Hipóteses do Segundo Turno.....	138
Tabela 4.27 - Resultados do Teste de Hipótese do Primeiro e Segundo Turnos.....	139

LISTA DE ABREVIATURAS

HPV	<i>Human Performance Variation</i>
BPM	<i>Business Process Modeling</i>
DOE	<i>Design of Experiment</i>
DES	<i>Events Discrets Simulation</i>
WIP	<i>Work in Process</i>
V&V	<i>Verification and Validation</i>
IV&V	<i>Independent Verification and Validation</i>
IDEF-SIM	<i>Integrated definition methods-simulation</i>
FIFO	<i>First in First Out</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A simulação computacional com o passar do tempo tem sido utilizada de forma crescente para auxílio à tomada de decisões (BANKS *et al.*, 2005; BRUZZONE *et al.*, 2007; SARGENT, 2009; LAW, 2007; LAW e KELTON, 2000). Esta já é apontada como uma das técnicas de pesquisa mais utilizadas devido principalmente à sua versatilidade, flexibilidade e poder de análise (RYAN e HEAVEY, 2006).

Segundo Chwif e Medina (2007), devido à complexidade dos sistemas reais, a simulação computacional consegue capturar com mais fidelidade as características dinâmicas e aleatórias desses sistemas, procurando repetir em um modelo computacional o mesmo comportamento que o sistema apresentaria quando submetido às mesmas condições de contorno.

Segundo Siebers (2006), a simulação a eventos discretos é geralmente reconhecida como um auxílio valioso para as tomadas de decisão estratégicas e táticas que são requeridas no estágio de avaliação dos projetos dos sistemas de manufatura. O modelo de simulação a eventos discretos é utilizado para determinar a quantidade de máquinas, estoques e trabalhadores que são necessários para produzir uma quantidade objetiva de produção.

Dessa forma, os especialistas em simulação têm um alto nível de responsabilidade para assegurar a precisão dos resultados. A imprecisão pode gerar altos custos, e isto pode levar a um desempenho deficiente do sistema e falhar no que diz respeito à demanda da produção (SIEBERS, 2006).

No entanto, ao representar um sistema com muitas atividades manuais que dependam em grande parte do trabalho de trabalhadores, a simulação nem sempre consegue captar com fidelidade tais sistemas, apresentando resultados pouco confiáveis quando comparado aos resultados reais (BAINES *et al.*, 2004). Esta diferença entre o desempenho predito e real é devido principalmente a modelos de simulação que não incorporam relacionamentos chave do comportamento humano, como o desempenho dos trabalhadores e os fatores que impactam neste desempenho (BERNHARDT e SCHILLING, 1997).

Para Siebers (2006), isto é atribuído à forma como o elemento humano é representado na maioria dos modelos de simulação. Muitas vezes considerando valores de desempenho determinísticos para suas atividades, resultantes de estudos de tempos e métodos. Para Baines *et al.* (2004), para melhorar a exatidão da simulação é preciso representar as pessoas de forma realista com seu comportamento real e seu subsequente desempenho.

Segundo Baines *et al.* (2005), os projetistas dos sistemas de manufatura têm um conhecimento escasso sobre os fatores que influenciam o desempenho dos trabalhadores dentro das fábricas, o que pode conduzir seus projetos a não se desenvolverem conforme o esperado, uma vez que os engenheiros frequentemente superestimam a eficiência ou a eficácia dos trabalhadores.

A incorporação de fatores humanos em modelos de simulação computacional já foi considerada como um “elo perdido” (Baines *et al.* 2004) e muito pouco se avançou nesse assunto. A grande maioria dos *softwares* de simulação representa com grande número de detalhes o comportamento de máquinas, porém trata os trabalhadores como simples recursos (SIEBERS, 2006).

No entanto tal cenário pode estar mudando. Segundo Bruzzone *et al.* (2007) a incorporação de fatores humanos está se tornando um dos temas principais de discussão por profissionais de diferentes áreas em modelagem e simulação.

Para Siebers (2006), a literatura indica claramente que o desempenho do trabalho varia ao longo da execução das tarefas, podendo ocorrer entre trabalhadores diferentes realizando a mesma tarefa e, além disso, quando o mesmo trabalhador repete uma tarefa. Além disso, tem sido mostrado na literatura que o desempenho dos trabalhadores também varia em consequência da sua dependência sobre os eventos passados e do estado atual do sistema.

A abordagem atual de representar o trabalhador dentro da simulação a eventos discretos ignora o potencial grande que a Variação no Desempenho Humano (*Human Performance Variation - HPV*) pode ter no desempenho do sistema de manufatura de mão-de-obra intensiva (SIEBERS, 2006).

1.2 Objetivos da pesquisa

Baseado no contexto apresentado no ítem anterior, esta pesquisa propõe aumentar a qualidade dos modelos de simulação através da consideração dos fatores humanos em um modelo de simulação a eventos discretos. Portanto, o objetivo desta pesquisa é responder as seguintes questões de pesquisa:

- Como inserir fatores humanos em um modelo de simulação a eventos discretos?
- A incorporação de fatores humanos, especificamente o ritmo circadiano e o trabalho em turnos, em um modelo de simulação a eventos discretos alteram os resultados previstos pelo modelo de simulação sem a incorporação desses fatores?

Para atingir aos objetivos apresentados, um estudo de simulação foi conduzido em uma linha de montagem com elevado número de atividades manuais, onde se propôs incorporar ao modelo de simulação dois fatores humanos que poderiam influenciar o desempenho do trabalhador: o trabalho em turnos e o ritmo circadiano.

De posse dos dados coletados em uma cronoanálise mais detalhada, realizada em quatro períodos durante cada turno de trabalho, estes foram adicionados ao modelo, o que resultou na alteração do tempo padrão considerado pela equipe da engenharia. Assim, foi possível avaliar a variabilidade ocorrida devido ao ritmo circadiano e também devido à mudança de turnos, através dos totais produzidos resultantes nos sete modelos de simulação (cenários) desenvolvidos nesta pesquisa.

1.3. Relevância da pesquisa

Segundo Baines *et al.* (2004), a simulação a eventos discretos representa máquinas em um amplo nível de detalhes, enquanto representa o elemento humano como um simples recurso. Este problema é especialmente agudo na modelagem de um sistema com alta proporção de trabalho manual, devido à alteração do desempenho do trabalhador na execução das tarefas ao longo do turno de trabalho.

Para Furnhan, Forde e Ferrari (1999), as pessoas que executam tais tarefas não se comportam na simulação da mesma maneira como as máquinas, já que elas são inerentemente instáveis, imprevisíveis e capazes de ação independente.

Diante disso, a contribuição desta pesquisa é de extrema importância, uma vez que ela busca melhorar a qualidade dos modelos de simulação desenvolvidos em sistemas de mão de obra intensiva, através da incorporação de fatores humanos dentro desses modelos, diminuindo assim a folga existente entre as previsões de desempenho do modelo e os resultados obtidos no sistema real.

Com isso, pretende-se mostrar que a consideração do fator humano tem um efeito significativo no comportamento de um modelo de simulação desenvolvido para um sistema de manufatura com elevada proporção de trabalho manual.

Pela complexidade do tema, nota-se que existe uma lacuna muito grande na literatura, o que reforça a contribuição científica desta pesquisa, cuja intenção não é sugerir um modelo de simulação ideal que represente o desempenho humano, mas ilustrar como os fatores humanos influenciam o desempenho do trabalhador durante a execução das atividades e como isso pode alterar os resultados previstos pelos modelos de simulação que não consideram tais fatores.

Além disso, pretende-se oferecer um estudo para a empresa de modo que ela possa incluir os fatores humanos nos modelos de simulação desenvolvidos, através de um método de cronoanálise mais detalhado, o que possibilitará uma maior segurança aos tomadores de decisão que utilizam a ferramenta de simulação computacional para avaliar os sistemas de manufatura.

1.4. Estrutura da dissertação

Para cumprir com os objetivos, a dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo é destinado à introdução, fornecendo as primeiras informações da pesquisa, os objetivos, a relevância e a estrutura da dissertação. O capítulo dois descreve a aplicação do método de pesquisa utilizado através da sistematização da aplicação da modelagem e simulação. No capítulo três é realizada a fundamentação teórica das pesquisas

realizadas acerca da simulação computacional, aplicação da simulação computacional em um sistema de manufatura e a incorporação de fatores humanos em modelo de simulação computacional. O capítulo quatro aborda a aplicação da simulação computacional e as análises dos resultados obtidos com a pesquisa. O capítulo cinco finaliza a pesquisa, abordando as conclusões obtidas e as recomendações propostas para os trabalhos futuros.

2. MÉTODO DE PESQUISA

2.1 Considerações iniciais

Este capítulo inicialmente apresenta a classificação da pesquisa quanto à natureza, objetivos, procedimentos e local de aplicação. Em seguida, é descrita a classificação da pesquisa quanto ao método quantitativo. Nesta fase são apresentadas duas metodologias que definem o conjunto de etapas necessárias que devem ser seguidas para responder às questões de pesquisa apresentadas no capítulo anterior.

2.2 Classificação da pesquisa

Jung (2004) e Marconi e Lakatos (2003) afirmam que quanto ao tipo de pesquisa, esta pode ser classificada quanto à sua natureza (básica ou fundamental, aplicada ou tecnológica); quanto aos seus objetivos (exploratória, descritiva ou explicativa); quanto aos procedimentos (experimental, operacional, estudo de caso) e quanto ao local de realização da mesma (laboratório ou campo). A Figura 2.1 ilustra essa classificação cujas áreas em destaque indicam a classificação da presente pesquisa.

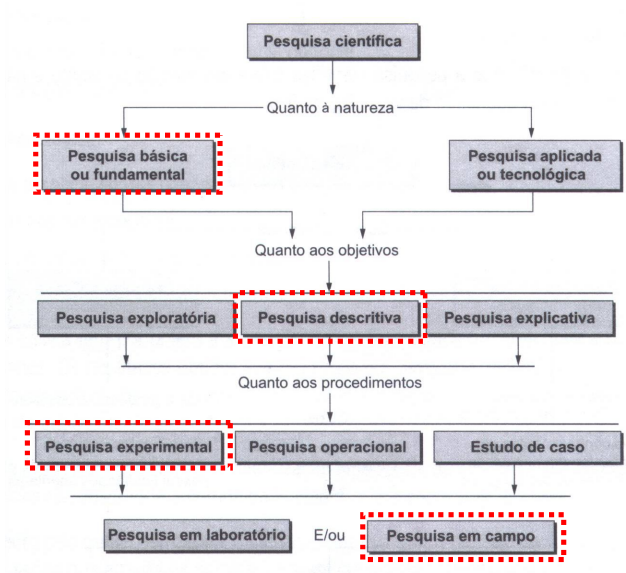


Figura 2.1 - Tipos de pesquisas científicas

Fonte: Adaptado de Jung (2004).

Na visão de Jung (2004) e Marconi e Lakatos (2003), quanto à natureza, a pesquisa básica ou fundamental objetiva entender ou descobrir novos fenômenos, com foco em conhecimentos básicos e fundamentais. Enquanto a pesquisa aplicada ou tecnológica objetiva a aplicação dos conhecimentos básicos na geração de novos produtos, processos, patentes e serviços (exemplo: física (básica ou fundamental): atração/retração entre os pólos magnéticos; computação (aplicada ou tecnológica): armazenamento em disco e memórias).

Quanto aos objetivos, a pesquisa exploratória visa à descoberta de teorias e práticas que modificarão as existentes – inovações tecnológicas; a pesquisa descritiva tem a finalidade de observar, registrar e analisar os fenômenos ou sistemas técnicos – identificação, registro e análise de características, fatores e ou variáveis; a pesquisa explicativa objetiva ampliar generalizações, definir leis mais amplas, modelos teóricos – síntese, teorização e reflexão.

Quanto aos procedimentos, a pesquisa experimental busca a descoberta de novos materiais, métodos, técnicas, protótipos de *software* - ensaios e estudos de laboratório, modelagem, simulação, sistemas e circuitos; a pesquisa operacional trata da busca do ótimo, uso de ferramentas estatísticas, métodos matemáticos da otimização, busca do melhor resultado – condição ótima; o estudo de caso permite investigar um fenômeno dentro de um contexto local e real – estudar o fenômeno, dar limites, definir claramente – entender como e por que as coisas funcionam.

A pesquisa em laboratório ou de campo é fundamentalmente a última etapa de todo o processo metodológico. Entende-se como pesquisa em laboratório aquela onde ocorre a possibilidade de se controlar as variáveis que possam intervir no experimento. Já a pesquisa em campo é onde não há a possibilidade de controle das variáveis.

Quanto ao modo de aquisição de referências podem-se utilizar os procedimentos de pesquisa bibliográfica e documental. O estudo bibliográfico visa conhecer e entender a base conceitual e as diversas contribuições científicas a respeito do assunto. Portanto, é fundamental o levantamento da base teórica sobre o assunto (conceitual) e de publicações relacionadas (estado da arte – últimas publicações). Já o estudo e referencial documental baseiam-se em documentos primários, fonte de informação que ainda não receberam organização ou tratamento analítico de publicação, como tabelas, relatórios, arquivos públicos, manuais originais e correspondências - de caráter inédito.

Quanto ao tempo de aplicação do estudo, com base em Jung (2004), cabe comentar que estudo transversal é aquele que se realiza em determinado instante de tempo (t) – naquele exato corte temporal. Estudo longitudinal é aquele no qual os dados são coletados ao longo do tempo, com obtenção sistemática e lenta de resultados. A presente pesquisa contemplou o estudo transversal, uma vez que foi realizada em determinado instante de tempo.

De acordo com a classificação apresentada pelos autores Jung (2004) e Marconi e Lakatos (2003) tem-se que a presente pesquisa é de natureza básica, com objetivos de caráter descritivo, utilizando procedimentos de estudo experimentais, através de uma pesquisa de campo, fundamentada em referências bibliográficas e documentais.

2.3 Método de pesquisa quantitativo: modelagem e simulação

Segundo Bertrand e Fransoo (2002), pesquisa quantitativa baseada em modelos é a pesquisa onde são desenvolvidos, analisados e testados modelos de relações causais entre variáveis de controle e variáveis de desempenho. Este tipo de pesquisa parte do princípio que podemos construir modelos objetivos que expliquem parte do comportamento dos processos reais, ou que podem capturar parte dos problemas de tomada de decisão enfrentados pelos gestores na vida real. Os diferentes tipos de pesquisa quantitativa, segundo Bertrand e Fransoo (2002) são apresentados na Figura 2.2.

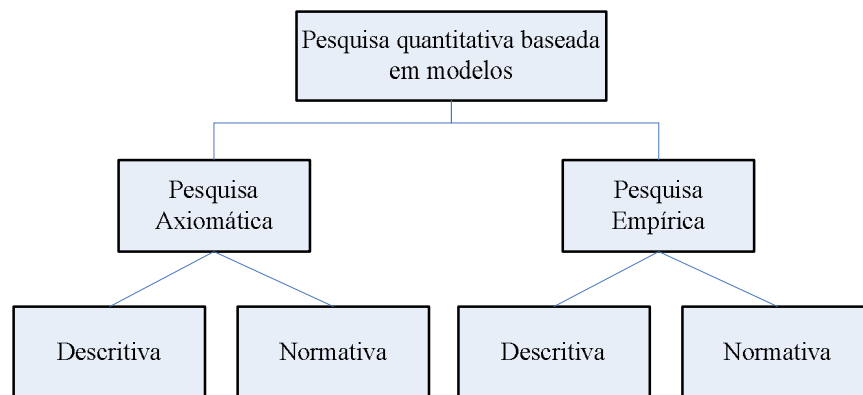


Figura 2.2 – Classificação da pesquisa quantitativa

Fonte: Bertrand e Fansoo (2002).

Bertrand e Fransoo (2002) classificam a pesquisa quantitativa em pesquisa axiomática e pesquisa empírica. As pesquisas axiomáticas e empíricas podem ser subdivididas em descritiva e normativa. Normalmente a pesquisa descritiva relaciona-se com o estudo de um processo e a pesquisa normativa está ligada ao estudo de um problema.

A pesquisa axiomática é definida pelas seguintes características:

- é guiada pelo modelo idealizado (assume-se que alguns aspectos do problema não afetam a solução);
- produz conhecimento sobre o comportamento de certas variáveis do modelo com base em suposições sobre o comportamento de outras variáveis dentro do modelo;
- o objetivo primário é obter soluções que forneçam conhecimento acerca da estrutura do problema;
- são utilizados métodos formais de áreas científicas como matemática, estatística e ciências da computação;
- os pesquisadores olham para os processos ou problemas através dos modelos matemáticos que possam ser utilizados;
- necessita-se de um forte fundo matemático;
- devem-se julgar quais formulações de problemas científicos são bons problemas, ou seja, problemas onde podem ser obtidos resultados de qualidade.

Os passos para realizar uma pesquisa axiomática são os seguintes:

- descrever as características dos processos ou problemas a serem estudados. A descrição do modelo conceitual deve usar tanto quanto possível os conceitos e termos aceitos como padrão na literatura;
- especificar o modelo científico do processo ou problema. Este deve ser apresentado de maneira formal, em termos matemáticos.

Na pesquisa axiomática descritiva, a modelagem do processo é o centro. Busca-se analisar um modelo para explicar suas características. O pesquisador parte de um modelo

conceitual e deriva um modelo científico. Depois são feitas algumas análises do modelo científico para ganhar conhecimento sobre o comportamento deste. Tipicamente não se passa à fase de solução do modelo e a qualidade da pesquisa está ligada à extensão na qual os resultados provam dar as características exatas do processo.

A extensão para a solução do modelo é feita na pesquisa axiomática normativa, onde a solução é a pesquisa central reportada. Em muitos artigos axiomáticos normativos, o processo de modelagem também está incluído e os resultados retornam ao modelo conceitual, que equivale ao que Mitroff *et al.* (1974) chama de *feedback* limitado. Nesse caso a qualidade da pesquisa pertence à extensão no qual o resultado prova ser a melhor solução possível para o problema. Quase todos os artigos no domínio da Pesquisa Operacional caem na área normativa.

A pesquisa empírica possui as seguintes características:

- o objetivo principal é assegurar que há um ajustamento das observações e ações na realidade e o modelo feito daquela realidade;
- este tipo de pesquisa é dirigido por resultados e medidas empíricos;
- deve ser planejada para testar a validade de modelos teóricos quantitativos e suas soluções;
- a essência é validar o modelo conceitual ou a solução da pesquisa axiomática;
- como os processos operacionais são todos diferentes, premissas básicas e características dos problemas são validadas para classes definidas de processos, implícitas nos modelos teóricos e problemas;
- ao contrário da pesquisa axiomática quantitativa, a pesquisa empírica não tem sido muito produtiva.

Os passos para aplicação de uma pesquisa empírica são os seguintes:

- identificar as premissas básicas dos processos onde estão baseados os modelos ou problemas teóricos em questão. Na literatura existem diferentes linhas de pesquisa que compartilham premissas comuns sobre processos ou problemas de decisão. Há por

exemplo uma linha de pesquisa baseada na visão do processo produtivo como um modelo de filas. Essa é chamada de premissa básica;

- identificar o tipo de processo ou problema no qual as premissas básicas se apliquem;
- desenvolver um critério objetivo para decidir se um processo da vida real pertence à classe de processos considerada e para identificar o sistema de decisão que representa o problema em questão. Diferentes pesquisadores devem chegar ao mesmo resultado acerca destas classificações;
- derivar das premissas básicas, hipóteses sobre o comportamento dos processos. Esse comportamento se refere a variáveis ou fenômenos que possam ser medidos;
- desenvolver uma maneira objetiva de medir ou fazer observações. Como não existe uma maneira geralmente aceita de medir as variáveis, os pesquisadores devem desenvolver maneiras próprias de medir e documentar essa etapa. Essa dificuldade ilustra a posição fraca da pesquisa quantitativa empírica na administração científica;
- aplicar os sistemas de medição, coletar e documentar os resultados;
- interpretar os dados, o que geralmente irá incluir o uso de análise estatística. Técnicas especiais são necessárias, pois os resultados não podem ser manipulados de maneira arbitrária como num projeto experimental. As hipóteses devem ser restritas ao comportamento dentro de um período esperado;
- interpretar os resultados em relação aos modelos teóricos ou problemas que deram origem às hipóteses testadas. Esse passo completa a fase de validação e pode resultar na confirmação do modelo teórico (ou partes) em relação ao problema de decisão e ao processo considerado, ou levar a rejeição (parcial ou não) e sugestões para melhorar os modelos teóricos.

A pesquisa empírica descritiva é principalmente voltada a criar um modelo que descreva adequadamente as relações causais que possam existir na realidade e levem ao entendimento do processo corrente. Nesse caso, segue-se o ciclo conceitualização, modelagem e validação do diagrama de Mitroff *et al.* (1974).

A pesquisa empírica normativa busca desenvolver políticas, estratégias e ações que melhorem a situação atual. Essa área de pesquisa é pequena. Houve tentativa em alguns artigos, mas o procedimento de verificação normalmente não é muito forte. Essa é a forma mais completa de pesquisa científica, onde é conduzido o ciclo completo: conceitualização, modelagem, solução do modelo e implementação. Em muitos casos essa pesquisa é construída em trabalhos publicados na categoria axiomática descritiva onde já foram desenvolvidos caminhos para os estágios de modelagem e solução do modelo.

Não se deve confundir pesquisa empírica com uso dos resultados da pesquisa axiomática para melhorar os processos. Nesse caso, os resultados se baseiam na crença que as premissas admitidas nos modelos são válidas e as soluções irão funcionar bem. Essas premissas são raramente testadas durante o projeto.

Uma importante contribuição para o estudo de métodos de pesquisa em simulação foi o trabalho apresentado por Mitroff *et al.* (1974). Nesse trabalho foi apresentado um método para o estudo da ciência como um sistema, baseado no processo de solução de problemas. O método, que é apresentado na forma de um diagrama, está ilustrado na Figura 2.3.

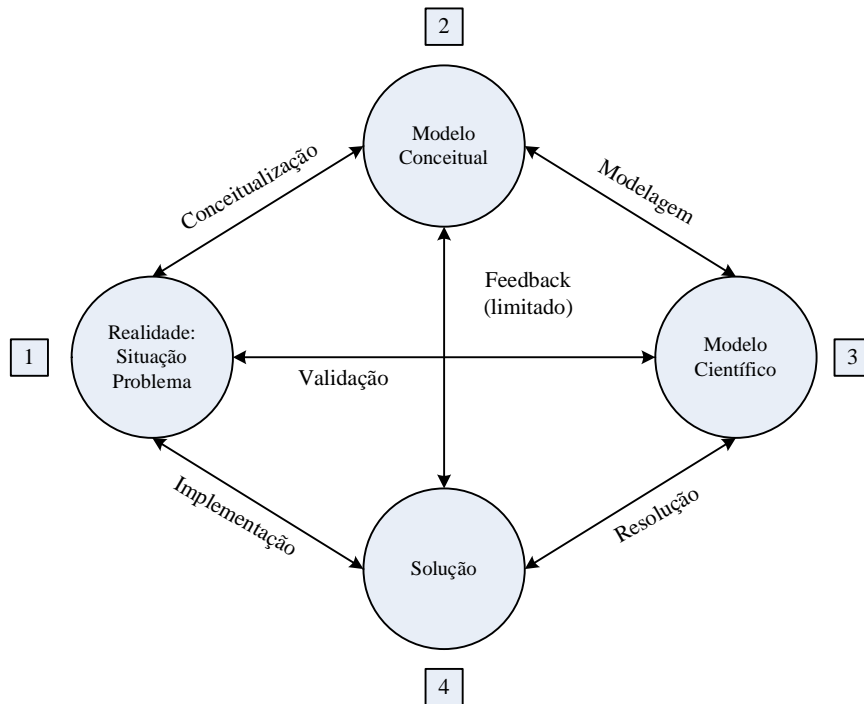


Figura 2.3 - Modelo de pesquisa para simulação

Fonte: Adaptada de Mitroff *et al.* (1974).

O modelo apresentado na Figura 2.3 permite representar diversas maneiras de fazer ciência por meio da simulação. O processo científico pode começar e terminar em qualquer ponto do modelo e ter qualquer número de iterações entre as atividades.

Da mesma forma, a pesquisa também pode terminar em diferentes pontos. Cada elemento e caminho requerem diferentes habilidades.

Neste modelo, a abordagem operacional de pesquisa consiste de quatro fases: Conceitualização, Modelagem, Resolução e Implementação.

Na fase de conceitualização, o pesquisador desenvolve o modelo conceitual do problema e do sistema sob estudo, define quais as variáveis que necessitam ser incluídas no modelo e também toma decisões sobre o escopo do modelo e do modelo a serem estudados.

A conceitualização é basicamente uma atividade filosófica que inicia a definição do problema a ser resolvido. Requer a capacidade de pensar globalmente e em termos mais intuitivos. É normalmente uma atividade realizada pela comunidade científica e pelos interessados no problema.

O modelo científico que deriva do modelo conceitual requer habilidades analíticas e formais, e normalmente está mais ligado à comunidade científica. A validação consiste no grau de correspondência entre a realidade e o modelo. A solução que deriva do modelo científico não é necessariamente o fim do problema de pesquisa. Até pode ser para alguns pesquisadores, mas para outros o problema só está resolvido na fase de implementação. Há ainda os que necessitam sugerir um novo problema e iniciar o ciclo novamente.

Na fase de modelagem, o pesquisador desenvolve o modelo quantitativo, definindo as relações causais entre as variáveis.

Na fase de solução pelo modelo, em geral, a matemática desempenha um papel determinante.

A fase de implementação do modelo consiste em derivar ações a partir da solução. Requer a habilidade de trazer uma mudança social significativa, e está normalmente relacionada aos gestores. Os resultados do modelo são implementados e um novo ciclo pode reiniciar. Essa fase é considerada a fase mais difícil, pois muitas vezes o que constitui um

problema e solução para o pesquisador pode não coincidir com o problema que o gestor encontra e a solução desejada por ele.

Mitroff *et al.* (1974) argumentam que um ciclo da pesquisa pode possivelmente começar e terminar em qualquer uma das fases do ciclo, desde que o pesquisador tenha conhecimento das partes específicas da solução do processo que ele está dirigindo e, conseqüentemente, das reivindicações que ele pode fazer com base nos resultados de sua pesquisa.

Nenhum aspecto individual do modelo é mais importante que outro, e os componentes dos sistemas não podem ser separados. Não se deve perceber qualquer componente como mais crítico e é errado alocar todo o esforço da pesquisa para estudar somente uma fase do sistema.

Na pesquisa axiomática descritiva, o processo de modelagem é o centro. O pesquisador tem um modelo conceitual, principalmente a partir da literatura e desenvolve um modelo científico para este. Além disso, o pesquisador faz algumas análises sobre o modelo científico para ganhar introspecção sobre o comportamento deste modelo. A extensão é feita na pesquisa axiomática normativa, onde o processo de solução do modelo é o processo central da pesquisa.

Na pesquisa empírica descritiva, o pesquisador tipicamente segue um ciclo de conceitualização, validação e modelagem. É interessante notar que o principal risco que Mitroff *et al.* (1974) comunica é preocupação exagerada com a validação, ou seja, o pesquisador deseja fazer um ajuste perfeito entre o modelo e a realidade.

Finalmente, a forma mais completa de pesquisa é a pesquisa empírica normativa, onde o ciclo de conceitualização, modelagem, solução do modelo e implementação é seguido.

De acordo com a classificação de Bertrand e Fransoo (2002), o método utilizado nessa pesquisa é a modelagem quantitativa empírica normativa. Justifica-se neste trabalho a pesquisa empírica pela necessidade de coleta de dados reais de um objeto de pesquisa, no qual o modelo conceitual deste objeto é confrontado com a realidade e o modelo computacional pretende representar o comportamento de uma situação real específica e faz referência a este objeto empírico específico. Esta pesquisa é também normativa, pois pretende encontrar estratégias para melhorar o sistema real existente.

2.4 Etapas para o desenvolvimento de uma pesquisa de modelagem e simulação

A primeira estrutura apresentada nesta pesquisa é a proposta por Chwif e Medina (2007), cujo desenvolvimento de um modelo de simulação compõe-se de três fases: concepção, implementação e análise, como mostra a Figura 2.4.

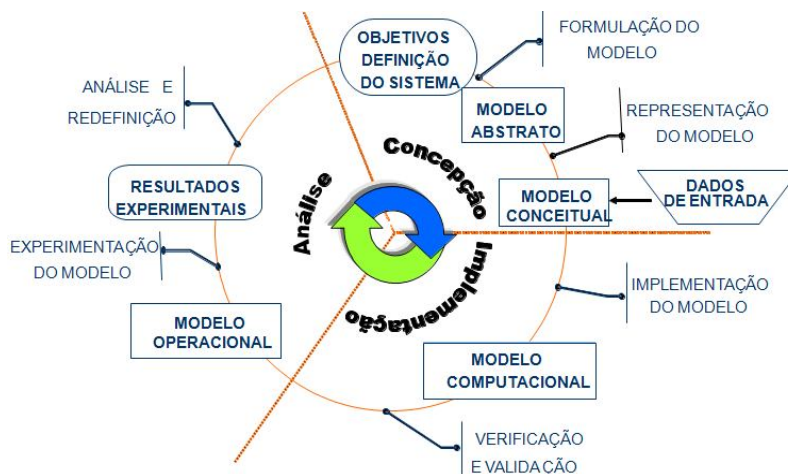


Figura 2.4 - Etapas de um projeto de simulação

Fonte: Chwif e Medina (2007).

Outra visão, proposta por Montevechi *et al.* (2010) e utilizada nesta pesquisa é apresentada na Figura 2.5. Os autores construíram um fluxograma, com base na estrutura anterior, para representar a lógica de um projeto de simulação que usa o planejamento e análise de experimentos para conduzir a fase de análise dos resultados do modelo de simulação. Nesta metodologia tem-se que três modelos devem ser confeccionados: o modelo conceitual, o modelo computacional e o modelo operacional. Da mesma forma, estes modelos devem ser validados e verificados.

Deste modo, esta segunda estrutura (Figura 2.5) é importante para guiar o modelador durante o projeto, uma vez que traz uma sequência lógica de etapas a serem cumpridas em um projeto de simulação, enquanto que a primeira estrutura (Figura 2.4) ressalta para o modelador

que podem ser necessárias várias iterações para que um projeto de simulação seja finalizado, e a cada iteração o conhecimento do problema aumenta, lembrando a forma espiral.

De acordo com as duas estruturas apresentadas, um projeto envolvendo modelagem e simulação começa com a fase de concepção, na qual o analista de simulação deve entender claramente o sistema a ser simulado e os seus objetivos, através da discussão do problema com especialistas. Assim, o modelo que está na mente do analista (modelo abstrato), deve ser transformado em um modelo conceitual através de alguma técnica de representação de modelo de simulação para que outras pessoas possam entendê-lo. Os dados de entrada também devem ser coletados nesta fase (CHWIF e MEDINA, 2007).

De acordo com Shannon (1975), há uma constante interação entre a construção do modelo conceitual e a coleta dos dados. Não se pode negar a importância de se ter dados adequados para alimentar o modelo, sendo que a expressão GIGO (*Garbage in - Garbage out*) também é aplicável aos modelos de simulação (PEGDEN, SHANNON e SADOWSKI, 1995). No entanto, é importante ressaltar que o modelo é que deve dirigir a coleta de dados e não vice-versa (PIDD, 2000).

Segundo Law (1991), a etapa de criação do modelo conceitual é o aspecto mais importante de um estudo de simulação. Chwif e Medina (2007) dedicam uma atenção especial a este modelo, uma vez que, segundo eles, muitos trabalhos de simulação não demonstram esta etapa. Segundo Perera e Liyanage (2000), a modelagem conceitual pode aumentar a qualidade dos modelos de simulação e ainda reduzir o tempo necessário para a construção dos modelos computacionais. Esta é a principal razão pela qual os investigadores (Perera e Liyanage 2000; Ryan e Heavey 2006; Greasley 2006; Chwif, Paul e Barreto 2006) apresentam uma interligação entre o mapeamento de processos e ferramentas de simulação em projetos de seu trabalho.

Ryan e Heavey (2006) afirmam que algumas técnicas de modelagem utilizadas em BPM (*Business Process Modeling*) fornecem o suporte necessário para um projeto de simulação. Ainda de acordo com os referidos autores, embora existam muitas técnicas de mapeamento de processos, elas concentram-se em apenas alguns dos projetos de simulação.

Nesta pesquisa, o modelo conceitual foi o ponto de partida, fornecendo informações ao modelo computacional. A representação do modelo conceitual foi desenvolvida na forma de um mapeamento de processo, realizado através de uma técnica selecionada. De acordo com

Leal (2003) e Pinho, Leal e Almeida (2006), estas técnicas devem ser selecionadas de acordo com as características do processo e os objetivos do trabalho. Além disto, os mapas gerados não devem ser caracterizados como um fim, mas um meio factível para visualização de melhorias.

Ainda na fase de concepção, a modelagem dos dados de entrada (destacada na Figura 2.5) foi desenvolvida de uma forma particular, uma vez que o objetivo principal dessa pesquisa é analisar a influência do fator humano em um modelo de simulação. Para tanto, optou-se por realizar uma cronoanálise mais detalhada, onde os dados foram coletados em quatro diferentes períodos durante cada turno para avaliar a influência do ritmo circadiano no desempenho do trabalhador e também entre turnos diferentes para avaliar a influência do trabalho em turnos no desempenho do trabalhador.

Na fase de implementação do modelo, o modelo conceitual é convertido em um modelo computacional através da utilização de alguma linguagem de simulação ou de um simulador comercial. O modelo computacional implementado deve ser comparado frente ao modelo conceitual, com a finalidade de avaliar se a sua operação atende ao que foi estabelecido na etapa de concepção. Alguns resultados devem ser gerados para a validação do modelo computacional, observando-se se o modelo é uma representação precisa da realidade (CHWIF E MEDINA, 2007).

Em seguida, o modelo computacional deve passar por dois procedimentos fundamentais em um estudo de simulação: a validação e a verificação. O termo validação se refere ao modelo conceitual, ou seja, consiste em aceitar ou não o modelo como uma boa representação do sistema real. Embora exista a validação operacional atribuída ao modelo computacional, que consiste em se utilizar técnicas estatísticas, como testes de hipóteses, para comparar os dados reais e simulados. O termo verificação está relacionado ao modelo computacional, ou seja, consiste em se comprovar que o modelo conceitual foi corretamente representado através de um modelo computacional. Em outras palavras, verificar se o modelo está sendo construído de forma correta. A verificação também consiste em eliminar do modelo os bugs de programação, através de depuradores presentes nos próprios *softwares* de simulação (CHWIF E MEDINA, 2007).

Na fase de análise, após a verificação e validação do modelo computacional, o modelo computacional está pronto para a realização de experimentos, dando origem ao modelo

experimental ou modelo operacional. Nesta etapa são efetuadas várias rodadas do modelo e os resultados da simulação são analisados e documentados. A partir dos resultados, conclusões e recomendações sobre o sistema podem ser geradas. Caso necessário, o modelo pode ser modificado, e este ciclo é reiniciado. Apesar de estes passos estarem dispostos em certa seqüência linear, isto não ocorre exatamente desta maneira em um estudo prático de simulação, e, segundo Paul (1992), pode haver várias iterações e realimentações no processo, à medida que o entendimento do problema muda.

Estes resultados devem ser comparados com os resultados do sistema real, a fim de se verificar o tamanho do erro. Uma vez que o erro esteja dentro de limites aceitáveis, o modelo está apto à realização de experimentos que podem ser definidos no planejamento realizado via DOE (*Design of Experiments*). Na presente pesquisa foram realizados experimentos estatísticos como o teste de hipótese, porém o DOE não foi utilizado.

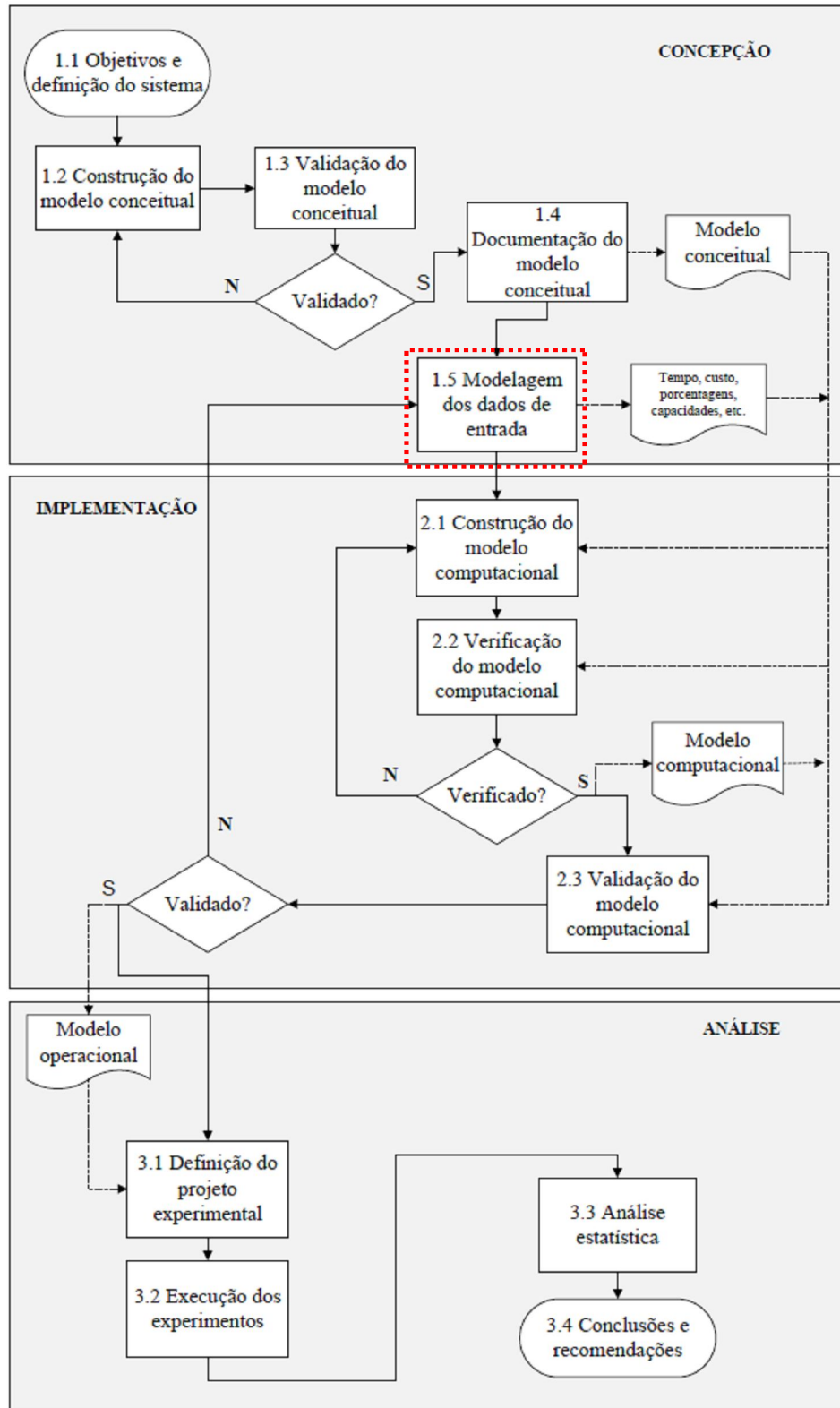


Figura 2.5 - Fases de um projeto de simulação, com destaque para a modelagem dos dados de entrada, desenvolvida nesta pesquisa de forma detalhada

Fonte: Adaptado de Montevechi *et al.* (2010).

2.5 Etapas para o desenvolvimento de um modelo de desempenho humano

A metodologia nos trabalhos de simulação busca sistematizar os passos de seu desenvolvimento, otimizando a integração entre *software*, modelador e usuário, e evitando desperdício de tempo, dinheiro e resultados frustrantes.

Segundo Baines *et al.* (2004), as etapas sugeridas para a seleção dos modelos de desempenho humano estão apresentadas na Figura 2.6.

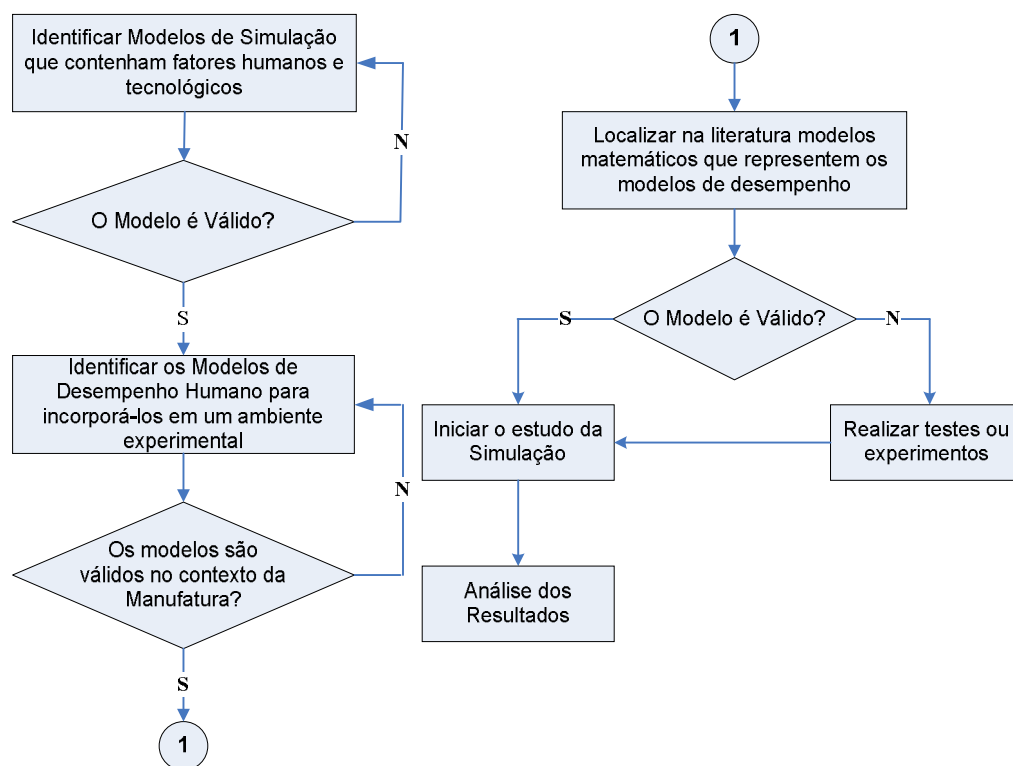


Figura 2.6 - Etapas para a seleção dos Modelos de Desempenho Humano

Fonte: Adaptado de Baines *et al.* (2004).

Nesta pesquisa, de acordo com as etapas apresentadas por Baines *et al.* (2004), primeiramente optou-se por desenvolver um modelo de simulação computacional baseado em uma linha de montagem que possui como principal característica o trabalho predominantemente manual, o que auxilia o desenvolvimento desta pesquisa no que se refere à incorporação de fatores humanos em um modelo de simulação a eventos discretos, já que a

presença do elemento humano nesta linha de montagem é um fator chave para o sucesso no desempenho do sistema. Essa linha de montagem é constituída principalmente por tarefas repetitivas com tempos de processamento curtos e, portanto, foi mais fácil neste sistema ter a oportunidade de observar a mesma tarefa durante um grande número de vezes.

A partir da validação e verificação do modelo computacional, e com base na fundamentação teórica, foi possível identificar alguns modelos de desempenho humano. Porém, esses foram desenvolvidos em contextos diferentes do objeto de estudo desta pesquisa, tais como uma Universidade, por exemplo, com alunos e não com trabalhadores trabalhando ao longo de um turno de trabalho em uma linha de montagem.

Segundo Baines *et al.* (2004), a seleção dos modelos de desempenho humano deve ser baseada em três critérios:

- os modelos devem ser válidos no contexto o qual eles foram derivados originalmente;
- deve existir literatura suficiente para indicar que o fator humano representado pelo modelo está presente no contexto industrial;
- as entradas requeridas para os modelos devem ser fáceis de serem obtidas. Nesse caso é desejável que os modelos consistam de funções matemáticas.

Portanto, baseado na escassez da literatura existente quanto à identificação de modelos de desempenho humano que podem ser aplicados em qualquer contexto, optou-se por identificar uma série de fatores humanos que poderiam influenciar o desempenho de um trabalhador na condução de suas atividades durante o turno de trabalho em um sistema de manufatura, através da fundamentação teórica.

A próxima etapa foi desenvolver um modelo de simulação computacional em uma linha de montagem que possui como principal característica o trabalho predominantemente manual. Tal fato auxilia o desenvolvimento desta pesquisa no que se refere à incorporação de fatores humanos em um modelo de simulação a eventos discretos, já que a presença do elemento humano nesta linha de montagem é um fator chave para o sucesso no desempenho do sistema.

Portanto, com base na literatura e nas condições de trabalho existentes na empresa utilizada nesse estudo, optou-se por analisar a influência de dois fatores: o ritmo circadiano e

o trabalho em turnos. Além disso, esses fatores foram escolhidos pela viabilidade de mensurar a variação ocorrida no desempenho do trabalhador através da alteração nos tempos de processamento.

2.6 Justificativa para utilização da Simulação Computacional

Justifica-se a utilização da Simulação Computacional nesta pesquisa, pela possibilidade de analisar a variabilidade do desempenho dos operadores, a partir da incorporação de dois fatores humanos, especificamente o ritmo circadiano e o trabalho em turnos, em um modelo de simulação, através dos dados obtidos pela cronoanálise realizada em diferentes períodos do dia e em diferentes turnos. Com a utilização dessa ferramenta foi possível realizar os experimentos sem interferir no desempenho do sistema real.

2.7 Considerações finais

No trabalho de Baines *et al.* (2004), utilizaram-se equações matemáticas que representavam a variação do desempenho ocorrida a partir da consideração de alguns fatores humanos em um modelo de simulação. No entanto Baines *et al.* (2004) utilizou-se de um modelo desenvolvido por Spencer (1987), que desenvolveu tal modelo a partir da variação do desempenho de estudantes em uma universidade.

Como o objeto de estudo desta pesquisa retrata uma linha de montagem, que apresenta características divergentes do ambiente de uma universidade, optou-se pela cronoanálise dos tempos de processamento das atividades, na própria linha de montagem, considerando quatro períodos durante os dois turnos de trabalho e a partir de então avaliar a variação ocorrida no total produzido. Desta forma esta pesquisa complementa o trabalho de Baines *et al.* (2004) visto que propõe utilizar a variação do tempo padrão em intervalos de tempo ao longo dos turnos ao invés de um modelo matemático.

Na presente pesquisa o método proposto por Baines *et al.* (2004), foi adicionado ao método proposto por Montevechi *et al.* (2010). Este método, representado na Figura 2.5, apresenta as fases de um projeto de simulação, no qual três modelos devem ser elaborados: o

modelo conceitual na fase de concepção, o modelo computacional na fase de implementação e o modelo operacional na fase de análise.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem a finalidade de apresentar os conceitos que compõe a fundamentação teórica desta pesquisa, com base em artigos de congressos importantes na área, artigos de periódicos e livros. Dessa forma, são apresentados conceitos importantes sobre a aplicação da simulação computacional em sistemas de manufatura, modelagem e simulação, fatores humanos e modelagem do desempenho humano, associados com a apresentação de alguns modelos de desempenho humano citados na literatura. Além disso, são apresentadas nesse capítulo as vantagens e benefícios da utilização da simulação computacional bem como suas desvantagens e limitações.

3.2 Modelagem e Simulação

3.2.1 Considerações iniciais

Na década de 1950, os primeiros modelos de simulação eram desenvolvidos em linguagens de programação de proposta geral, como o FORTRAN, (PIDD, 2004). Para Kelton, Sadowski e Sturrock (2007), a simulação era uma ferramenta muito cara e especializada nesta época, e só era utilizada por grandes corporações (indústrias aeroespaciais e aciarias), pois exigia um grande investimento de capital. Os sistemas de maior complexidade apresentavam limitações tanto na modelagem como na execução da simulação tornando a utilização da ferramenta em alguns casos inviável (GAVIRA, 2003).

Em seguida, na década de 1960, começaram a surgir as primeiras linguagens de simulação, que continham rotinas específicas e símbolos de diagramas de fluxo que facilitavam a construção de modelos de simulação a eventos discretos (PIDD, 2004).

Essa evolução a partir da década de 60 se deu em função da necessidade de desenvolvimento da ferramenta como consequência de uma demanda maior em termos de resultados mais confiáveis e de uma maior visualização de seus benefícios por parte dos usuários. O surgimento de *softwares* específicos acoplados a simuladores capazes de reproduzir graficamente inúmeros sistemas ilustra essa idéia. Dentre as vantagens da

utilização dos *softwares* pode-se citar a facilidade de compreensão, o treinamento de pessoal e uma melhor visualização do sistema produtivo das indústrias (SILVA, 2005).

A simulação tal como é conhecida hoje, iniciou-se na década de 1970, uma vez que os computadores tornaram-se mais rápidos e mais baratos, e o valor da simulação começava a ser descoberto por outras indústrias, embora a maioria ainda fosse de grande porte (KELTON, SADOWSKI e STURROCK, 2007). Segundo os mesmos autores, foi nesta época também que a simulação passou a fazer parte dos currículos de Engenharia de Produção e Pesquisa Operacional.

Na década de 1980, com a introdução dos computadores pessoais, surgiram linguagens de simulação mais evoluídas como SLAM II e SIMAN (*SIMulation ANalysis*). De acordo com Banks *et al.* (2005), neste período também surgiram *softwares* de simulação com interfaces gráficas com o usuário, animação e outras ferramentas de visualização.

A simulação começou realmente a maturar no início da década de 1990, onde várias empresas pequenas abraçaram esta ferramenta e começaram a utilizá-la nos primeiros estágios de projetos (KELTON, SADOWSKI e STURROCK, 2007).

Law e Kelton (2000) destacam que no passado, a simulação era considerada uma técnica de último recurso. Com o passar do tempo, no entanto, a simulação vem se tornando uma das técnicas mais utilizadas. Ryan e Heavey (2006) apontam a simulação como uma das técnicas de pesquisa mais utilizadas devido à sua versatilidade, flexibilidade e poder de análise.

A Tabela 3.1 apresenta uma lista dos principais pacotes de *softwares* de simulação a eventos discretos existentes.

Tabela 3.1 - *Softwares* de Simulação a eventos discretos

Arena	Micro Saint	Simprocess
Awesim	Plant Simulation	Simulate
Extend V6	Promodel	Witness

Fonte: Vicenzi *et al.* 2009

Harrel, Ghosh e Bowden (2004) ressaltam que no futuro a simulação continuará a se expandir de acordo com a evolução na tecnologia de *softwares*, tornando os modelos mais acessíveis aos tomadores de decisões.

3.2.2 Conceitos e definições

3.2.2.1 Simulação

Segundo Harrel, Ghosh e Bowden (2004) e Law e Kelton (2000), a simulação é a imitação de um sistema real modelado em computador para posterior realização de experimentos para avaliação e melhoria de seu desempenho.

De acordo com Banks (2000), simulação é uma metodologia de solução de problemas indispensável para a solução de muitos problemas do mundo real, pois pode ser utilizada para descrever e analisar o comportamento de um sistema, perguntar questões do tipo “e se” e ajudar no projeto de sistemas reais.

Leal (2003) define simulação como a representação de um procedimento em um tempo menor do que levaria no cenário real e com menor custo, favorecendo a previsão do comportamento do sistema para que se possam tomar as devidas ações corretivas visando à redução de custos.

Segundo Duarte (2003), a simulação não é uma ferramenta que substitui o trabalho de interpretação humana, mas sim uma ferramenta capaz de fornecer resultados para análises mais elaboradas a respeito da dinâmica do sistema, permitindo desta maneira uma interpretação mais profunda e abrangente do sistema estudado.

3.2.2.2 Simulação a eventos discretos

Segundo Harrel, Ghosh e Bowden (2004) e Law e Kelton (2000), os modelos de simulação a eventos discretos (*Events Discrets Simulation - DES*) são aqueles que mudam suas variáveis de estado em pontos discretos no tempo, a partir da ocorrência de eventos.

Uma célula de manufatura é um exemplo de sistema discreto. A variável de estado, status de utilização de uma determinada máquina (vazio, ocupado ou quebrada), muda somente quando um dos seguintes eventos acontece isoladamente: ocorre a quebra da máquina, ou uma peça entra na máquina para ser processada, ou uma peça sai da máquina após processamento, ou ainda é solicitada a parada da máquina para a manutenção preventiva.

3.2.2.3 Sistema

Blanchard (1991) e Banks *et al.* (2005) definem sistema como um conjunto de objetos que estão agrupados em alguma interação regular ou interdependência com o objetivo de satisfazer algum propósito. Desta definição observam-se os seguintes pontos chaves: um sistema consiste de múltiplos elementos, estes elementos estão inter-relacionados e trabalham em cooperação e um sistema existe para o propósito de alcançar objetivos específicos (HARREL, GHOSH E BOWDEN, 2004). Neste sentido, algumas máquinas, matérias-primas, pessoas, documentos e processos juntos constituem um sistema de manufatura de motores de automóveis, por exemplo.

De acordo com Law e Kelton (2000), na prática, o que é definido como sistema depende do objetivo do estudo. São exemplos de sistema: sistema de tráfego, sistema policial, sistema econômico, sistema bancário, sistema de manufatura, dentre outros. O que para um estudo particular foi definido como sistema, em outro estudo pode ser apenas um subconjunto de elementos de um sistema mais amplo.

Um sistema pode ainda ser hipotético, ou seja, não existe fisicamente e está em fase de projeto. Desta necessidade surge uma das reais contribuições da simulação, o fato de se poderem simular novos sistemas para prever o desempenho destes sob várias circunstâncias (BANKS *et al.*, 2005).

3.2.2.4 Modelo

Segundo Hillier e Lieberman (2001), modelo é uma representação de um sistema real, onde somente os aspectos relevantes para a análise em questão serão considerados. O uso de modelos traz muitos benefícios como redução de tempo, custo e perdas materiais.

Segundo Bertrand e Fransoo (2002), um modelo é sempre uma abstração da realidade no sentido de que a realidade completa não está incluída. Para estes autores, tem-se um modelo idealizado quando, além da abstração da realidade a qual é estendida de forma que as relações essenciais tornam-se evidentes, as funções tornam-se unidimensionais ou bidimensionais, diferenciáveis etc., com o objetivo de fazer o modelo tratável para análise matemática.

Diversos autores (CARRIE, 1988; HARREL, GHOSH e BOWDEN, 2004; LAW e KELTON, 2000) classificam os modelos de simulação sob três diferentes dimensões: tempo, mudança de estado do sistema e aleatoriedade, detalhadas a seguir:

- Tempo: Quando o tempo não é relevante ou é invariável, o modelo é dito estático. Caso a passagem do tempo exerça papel fundamental o modelo é dito dinâmico (BANKS, 1998).
- Estado: Se o estado do sistema muda continuamente com o tempo, o sistema é dito ser contínuo. Caso o estado do sistema mude instantaneamente em pontos específicos do tempo, o sistema é dito ser discreto (LAW e KELTON, 2000; BANKS *et al.*, 2005). De forma análoga, classificam-se os modelos em contínuos ou discretos.
- Aleatoriedade: Quanto à aleatoriedade, os modelos que não possuem entradas aleatórias são determinísticos. Se o modelo possuir pelo menos uma entrada aleatória então ele é estocástico.

3.2.2.5 Variáveis

Segundo Harrel, Ghosh e Bowden (2004), projetar um novo sistema ou fazer melhorias em um sistema existente requer mais que simplesmente identificar os elementos e os objetivos de desempenho do sistema. Isto requer uma compreensão de como os elementos do sistema afetam um ao outro e o desempenho global dos objetivos.

Para ajudar na compreensão desses relacionamentos, Harrel, Ghosh e Bowden (2004) classificam as variáveis do sistema em três tipos: variáveis de decisão, variáveis de resposta e variáveis de estado.

As variáveis de decisão, também chamadas de variáveis independentes quando se realizam experimentos, afetam o comportamento do sistema. Estas variáveis podem ser controláveis ou incontroláveis dependendo do usuário poder ou não manipulá-las.

As variáveis de resposta, também chamadas variáveis de desempenho ou de saída, são dependentes e medem o desempenho do sistema em resposta a um particular conjunto de variáveis de decisão.

As variáveis de estado indicam o estado do sistema em qualquer ponto específico do tempo. Para Law e Kelton (2000), um sistema pode ser classificado segundo a forma como as variáveis de estado mudam. Quando as variáveis de estado mudam instantaneamente em pontos específicos do tempo diz-se que o sistema é discreto. Por outro lado, um sistema é dito contínuo quando as variáveis de estado mudam continuamente no tempo.

3.2.2.6 Elementos

Sob o enfoque da simulação, um sistema consiste de entidades, atributos, atividades, recursos e controles (HARREL, GHOSH E BOWDEN, 2004). Esses elementos definem quem, o quê, quando, onde e o como ocorre o processamento da entidade na simulação, como é explicado a seguir:

- Entidades: São os itens processados através do sistema tais como produtos, clientes e documentos (HARREL, GHOSH E BOWDEN, 2004).
- Atributos: São características de uma entidade que são únicas àquela entidade. Os atributos são críticos para o entendimento da função e do desempenho das entidades na simulação (INGALLS, 2002).
- Atividades: São as tarefas realizadas no sistema que estão direta ou indiretamente envolvidas no processamento das entidades (HARREL, GHOSH E BOWDEN, 2004; CARRIE, 1998).
- Recursos: São os meios pelos quais as atividades são realizadas. Eles fornecem as instalações de apoio, equipamentos e pessoal para condução das atividades (HARREL,

GHOSH E BOWDEN, 2004). Segundo Ingalls (2002), os recursos representam algo que tem uma capacidade restrita.

- Controles: Ditam como, quando e onde as atividades são realizadas. Eles definem as regras do sistema.

3.2.2.7 Simulação terminante e não-terminante

Segundo Law e Kelton (2000), a simulação é dita terminante quando se está interessado em estudar um sistema num dado intervalo de tempo, ou seja, conhecer seu comportamento ao longo deste intervalo, sendo definidas as datas de início e término da simulação.

A simulação é dita não-terminante quando se está interessado em estudar o sistema a partir do momento em que o mesmo estiver em um estado estável, atingido após certo período de aquecimento, onde se determina e elimina as tendências iniciais. Isso não quer dizer que ela nunca termine, nem que o sistema não tenha fim, mas que ela poderia continuar infinitamente sem nenhuma mudança estatística no comportamento (LAW e KELTON, 2000).

3.2.3 Vantagens da Simulação Computacional

Segundo Chwif e Medina (2007), como os sistemas modernos de manufatura geralmente apresentam grande complexidade devido à sua natureza dinâmica e aleatória, um modelo de simulação pode capturar essas características com mais precisão, já que ele consegue reproduzir em um computador o mesmo comportamento que o sistema apresentaria quando submetido às mesmas condições de contorno.

Shannon (1998) afirma que a simulação é uma das ferramentas mais importantes para os tomadores de decisão que são responsáveis pela concepção e operação dos processos e sistemas complexos.

Segundo Reeb e Leavengood (2003), a simulação deve ser utilizada quando não é possível realizar uma experimentação com o sistema real, quando outros modelos não funcionariam, quando é necessário analisar como os sistemas operam em um determinado período de tempo ou deseja-se comparar projetos alternativos.

De acordo com Greasley (2003), a animação da simulação pode ser utilizada para comunicar para os diretores, clientes e funcionários o “antes” e o “depois” da implantação de um novo projeto, mostrando como as mudanças afetarão o processo na prática. Os mesmos autores afirmam também que a animação da simulação pode ser utilizada para treinar funcionários diante de uma nova operação do sistema e permitir que eles criem uma visão geral dos benefícios da mudança a partir da visão do modelo em execução.

Além das vantagens apresentadas acima, Shannon (1998) ressalta as seguintes vantagens da utilização da simulação:

- possibilidade de se testar novos *designs* e *layouts* sem a implementação real dos recursos necessários;
- possibilidade de ser utilizada para explorar novas políticas de alocação de funcionários, procedimentos operacionais, tomadas de decisão, estruturas organizacionais, fluxos de informação, sem causar nenhuma ruptura no sistema real da organização;
- permite a identificação de gargalos nos fluxos de informação, material e produto e realiza testes com o objetivo de aumentar cada taxa;
- permite a realização de testes de hipótese em relação a “como” e “por que” certos fenômenos ocorrem no sistema;
- permite o controle do tempo. Assim, sistemas podem ser simulados por meses ou anos em questão de segundos e fornecer resultados visualizados em longo prazo. Além disso, pode-se diminuir a velocidade da simulação para a realização de estudos;
- permite adquirir conhecimento em relação a como o sistema funciona e a identificação de quais são as variáveis que mais afetam o desempenho do modelo;

- significa uma maior possibilidade de realização de experimentos com situações não familiares e responder a questões “e se”.

Os benefícios ganhos com um estudo de simulação são apresentados abaixo (BELGE, 2008):

- evita retrabalhos desnecessários por ser uma ferramenta que permite análise de, por exemplo, de uma linha antes de sua implementação;
- aumento da produtividade, com menor tempo de movimentação dos recursos decorrente da reorganização física e/ou da alteração das tarefas;
- aumento da satisfação do cliente devido a um menor tempo de espera para as ordens de produção no sistema;
- melhores e maiores informações para a tomada de decisão. Ao invés de apenas o tempo médio que as unidades gastam numa fila de estoque em processo (*Work in Process - WIP*), teremos o mínimo, o máximo, um histograma, um gráfico ao longo do tempo, e o intervalo de confiança;
- economia no tempo de trabalho dos analistas comparado às técnicas manuais ou às técnicas que consomem mais tempo. Mais dados de tempo e de custo podem ser desenvolvidos rapidamente com a simulação, comparado ao uso de planilhas várias vezes fazendo a variação das taxas de chegada de ordens de produção;
- a simulação requer uma real necessidade de conhecer profundamente o processo e/ou o problema que é objeto da simulação;
- trabalho em grupo e comunicação. Devido ao aspecto gráfico e à habilidade de imitar a realidade, as pessoas tendem a ficar facilmente envolvidas no projeto, e tendem a compreender mais rapidamente os desdobramentos das mudanças propostas. O passo de validação do projeto requer uma coordenação de idéias.

Além de todas as vantagens apresentadas acima, um modelo de simulação permite a consideração de aspectos característicos do trabalho humano em sua concepção, em contraposição a modelos que assumem o comportamento humano como o de uma máquina. Por exemplo, Baines *et al.* (2004) sugerem que o efeito da idade do trabalhador e o efeito do

ritmo circadiano podem ser inseridos em modelos de simulação através de algumas funções e parâmetros.

3.2.4 Desvantagens da Simulação Computacional

Segundo Carson (2004), frequentemente a simulação consome tempo, os dados não estão disponíveis ou são caros de se obter, e o tempo disponível para as tomadas de decisões não são suficientes para um estudo seguro. Em algumas situações, as animações e outras exibições visuais, combinadas com a pressão de tempo em todos os projetos, podem enganar os tomadores de decisão com conclusões prematuras baseado em evidências insuficientes.

Segundo Law e Kelton (2000), a simulação apresenta algumas desvantagens:

- os modelos de simulação são caros e consomem tempo para serem desenvolvidos;
- a execução de um modelo de simulação estocástico só estima as características do mesmo para valores específicos dos parâmetros de entrada. Assim, serão necessárias várias execuções independentes do modelo para os conjuntos de parâmetros a serem estudados. Por essa razão é que os modelos de simulação geralmente não são tão eficientes em relação à otimização;
- a grande quantidade dos dados gerados por um estudo de simulação faz com que as pessoas confiem no modelo mais do que deveriam. Se um modelo não for a representação adequada de um dado sistema, não importa o tipo de informação que será obtida, a real utilidade será mínima.

Além das desvantagens apresentadas acima, Shannon (1998) identifica que:

- a modelagem de um dado sistema é uma “arte” que requer um treinamento especializado e as habilidades dos modeladores tendem a variar amplamente. A utilidade do estudo dependerá diretamente da qualidade do modelo desenvolvido e das habilidades do modelador;

- a coleta dos dados de entrada confiáveis pode consumir grande quantidade de tempo e mesmo assim os resultados podem ser questionáveis. A simulação não pode compensar dados inadequados;
- modelos de simulação envolvem a execução de dados de entrada, produzindo as saídas propriamente ditas, surgidas em função das rodadas realizadas. Os modelos não geram por si só uma solução ótima, servindo apenas como uma ferramenta de análise a partir de condições pré-estabelecidas pelo modelador.

Embora os vendedores de *softwares* de simulação tenham desenvolvido pacotes que exigem somente a entrada de dados para sua operação (modelos genéricos), simulação não é só conhecimento de *software*. Um estudo de simulação é uma atividade sofisticada de análise do sistema que exige que o analista tenha, ainda que mínimo conhecimento do método de simulação (validação de modelos, seleção de distribuições de probabilidade para entrada de dados, projeto e análise de experimentos simulados, etc.), teoria da probabilidade, estatística, gerenciamento de projetos, e conhecimento detalhado das operações do sistema a ser estudado (LAW, 2003).

3.2.5 Validação, Verificação e Credibilidade

De acordo com Law e Kelton (2000), validação é o processo de determinar se um modelo de simulação é uma representação precisa do sistema real, para os objetivos particulares do estudo.

Para Chwif e Medina (2007) o objetivo de validar o modelo é o mesmo de responder à seguinte pergunta: “será que está se desenvolvendo o modelo correto?”, ou mesmo “será que as considerações feitas, o nível de detalhes, o escopo do modelo, representam de forma adequada o sistema a ser simulado?”.

Na visão de Banks *et al.* (2005), a validação geralmente é alcançada através da calibração de um modelo, um processo iterativo de comparação do modelo contra o comportamento do sistema atual e usando as discrepâncias entre os dois, e as percepções adquiridas, para melhorar o modelo. Os mesmos autores completam que este processo pode

ser repetido até que a precisão do modelo seja julgada como aceitável. Já que não existe validade absoluta de um modelo (LAW, 2009).

Um modelo deve ser desenvolvido para um propósito específico (ou aplicação) e sua validade deve ser determinada em relação a esse propósito. Um modelo pode ser válido para um conjunto de condições experimentais e inválido em outros (SARGENT, 2009).

Segundo Sargent (2009), validação e verificação dos modelos de simulação (muitas vezes chamadas de V&V – *Validation and Verification*) são etapas críticas no desenvolvimento de um modelo de simulação. O autor aponta quatro abordagens básicas para decidir se um modelo é válido ou não:

- a própria equipe de desenvolvimento do modelo avalia se o modelo de simulação é válido. Essa decisão subjetiva é tomada com base nos resultados de testes e avaliações conduzidas como parte do processo de desenvolvimento do modelo;
- o futuro usuário do modelo é envolvido juntamente com a equipe de desenvolvimento na determinação da validade do modelo para que ele determine a validade do modelo, o que permite a credibilidade do modelo;
- a decisão sobre a validade ou não do modelo cabe a terceiros, o que é chamado verificação e validação independente (IV&V). Os terceiros são independentes em relação à equipe de desenvolvimento do modelo de simulação e do usuário do modelo. Neste caso, esses terceiros devem possuir um completo entendimento a respeito do propósito da simulação, de forma a realizar a condução do IV&V, que pode ser realizada durante o desenvolvimento ou após o término do modelo;
- uso de modelos de escores. São atribuídos escores a diversos aspectos de um modelo já validado (padrão). Se os escores do modelo em avaliação forem maiores do que os escores do modelo padrão, o modelo é considerado validado.

Segundo Carson (2004) existe diversas técnicas que podem ser usadas durante a validação, incluindo:

- O uso da animação e outros displays visuais para comunicar suposições de modelos.

- Mensurações de desempenho de saída para uma configuração de modelo representando um sistema existente ou um projeto inicial, que membros do time possam julgar como modelos razoáveis.

Segundo Sargent (2009), as técnicas de validação podem ser objetivas (uso de algum tipo de teste estatístico ou procedimento matemático, por exemplo, teste de hipóteses e intervalos de confiança) ou subjetivas. A combinação das técnicas geralmente é utilizada. Alguns exemplos das técnicas de validação são apresentados a seguir:

- Animação: O comportamento operacional do modelo é apresentado graficamente conforme o modelo é simulado ao longo do tempo.
- Comparação com outros modelos: Vários resultados do modelo de simulação a ser validado são comparados com resultados de outros modelos já validados.
- Testes de degeneração: A degeneração do comportamento do modelo é testada através da seleção adequada de valores de entrada e dos parâmetros internos. Ex: A fila continua a aumentar se a taxa de chegada for maior que a taxa de serviço?
- Validação por eventos: Os eventos ou ocorrências do modelo de simulação são comparados com os eventos ou ocorrências do sistema real para determinar se eles são semelhantes.
- Testes de condição extrema: A estrutura e as saídas devem ser razoáveis com condições extremas. Ex: Se o estoque em processo for zero, a produção deve ser zero.
- Validação face-a-face: Os especialistas do sistema são questionados para avaliar se o modelo e seu comportamento são razoáveis.
- Validação por dados históricos: Se houver dados históricos, parte dos dados será usada para construir o modelo e o restante para validar o modelo.
- Métodos históricos: Racionalismo, Empirismo e Economia Positivista. O Racionalismo assume que todos sabem se as proposições do modelo são verdadeiras. Deduções lógicas dessas proposições são usadas para desenvolver um modelo válido. O Empirismo requer que qualquer pressuposto e saída sejam validados empiricamente. A Economia Positivista requer somente que o modelo seja capaz de

prever o futuro e não se preocupa com os pressupostos ou estruturas (relações de causalidade ou mecanismos).

- Validação interna: Várias réplicas de um modelo estocástico são realizadas para determinar a variabilidade estocástica existente no modelo. Uma grande variabilidade pode questionar os resultados do modelo.
- Validação multi-estágio: Este método de validação consiste em:
 - Desenvolver as hipóteses na teoria, observação e conhecimentos gerais.
 - Validar as hipóteses do modelo sempre que possível testando empiricamente.
 - Comparar as relações entre entrada e saída com o sistema real.
- Gráficos operacionais: Os valores de diversas medidas de desempenho são apresentados graficamente ao longo da rodada do modelo.
- Análise de sensibilidade: Consiste em mudar os valores da entrada para determinar os efeitos nas saídas. Os parâmetros sensíveis devem estar suficientemente precisos antes do uso do modelo.
- Validação preditiva: O modelo é utilizado para prever o comportamento do sistema e, em seguida, as comparações são feitas entre o comportamento do sistema e o comportamento previsto pelo modelo.
- Rastreamento: Os comportamentos de diferentes tipos de entidades específicas no modelo são rastreados através do modelo para determinar se a lógica do modelo está correta e se a precisão necessária foi obtida.
- Testes Turing: Neste tipo de validação, os especialistas são questionados se conseguem distinguir entre saídas do sistema real e do simulado.

O uso de técnicas estatísticas para auxiliar na validação de modelos envolve uma comparação objetiva e quantitativa entre o sistema atual e o modelo de simulação. Segundo Chung (2004), se não existir diferença estatisticamente significativa entre os conjuntos de dados, então o modelo é considerado válido. Contrariamente, se existir diferença

estatisticamente significativa, então o modelo não é válido e necessita de trabalho adicional antes que análises futuras sejam conduzidas.

Balci e Sargent (1982) sugerem o uso de teste de hipóteses como uma forma comum de análise objetiva para validar os modelos de simulação. Segundo esses autores, as hipóteses testadas são:

- H_0 : O modelo é válido para a faixa aceitável de precisão sobre as condições experimentais dadas.
- H_1 : O modelo não é válido para a faixa aceitável de precisão sobre as condições experimentais dadas.

E ainda segundo Balci e Sargent (1982), existem duas possibilidades de errar na tomada de decisões utilizando testes de hipóteses em simulação:

- Erro do tipo I: rejeitar o modelo, dado que ele é válido.
- Erro do tipo II: aceitar o modelo, dado que ele é inválido.

Outra forma de se utilizar a Estatística para auxiliar na validação do modelo de simulação é utilizar intervalos de confiança, conforme apresentado por Kleijnen (1995). A idéia consiste em construir o intervalo de confiança para a diferença entre os dois conjuntos (dados do modelo e dados do sistema real). Se o intervalo contiver o zero pode-se afirmar que com um nível de confiança $(1-\alpha)$ 100% que as respostas são equivalentes (do sistema real e do modelo de simulação). Onde α é o nível de significância adotado.

Na visão de Balci e Sargent (1982) e Sargent (2009), é preferível o uso de intervalos de confiança ou testes de hipóteses para as comparações porque eles permitem decisões objetivas. Embora, segundo os mesmos autores, uso de gráficos é a abordagem mais comum para a validação operacional.

Entretanto, Kleijnen (1995) conclui em seu artigo sobre verificação e validação de modelos, que os analistas e usuários do modelo de simulação devem ser convencidos de sua validade, não somente por técnicas estatísticas, mas também pela aplicação de outros procedimentos, como por exemplo, uso da animação para auxiliar a validação face a face ou

uso do teste de *Turing*. Uma vez que, segundo o mesmo autor, a simulação continuará sendo tanto arte quanto ciência.

Segundo a representação ilustrada na Figura 3.2, primeiramente o problema a ser modelado é identificado, sistema (real ou proposto), e o modelo conceitual, que é a representação matemática, lógica ou verbal do sistema, é desenvolvido através da fase de análise e modelagem. Nesse momento, ocorre a validação do modelo conceitual, que consiste em determinar se as teorias e os pressupostos subjacentes ao modelo conceitual estão corretos e se a representação da entidade problema do modelo (sistema real) e a estrutura, lógica e os relacionamentos matemáticos e causais do modelo conceitual são razoáveis para a finalidade deste.

Posteriormente, o modelo conceitual é implementado através de uma programação computacional. Nessa fase, ocorre a verificação do modelo computacional que consiste em determinar se o modelo conceitual foi corretamente traduzido em um programa de computador, isto é depurando o programa de simulação computacional (LAW, 2003). Para Law, 2003, p.66), “embora verificação seja simples no conceito, depurar programas de simulação em larga escala é uma tarefa difícil e árdua devido ao grande número de caminhos do programa”.

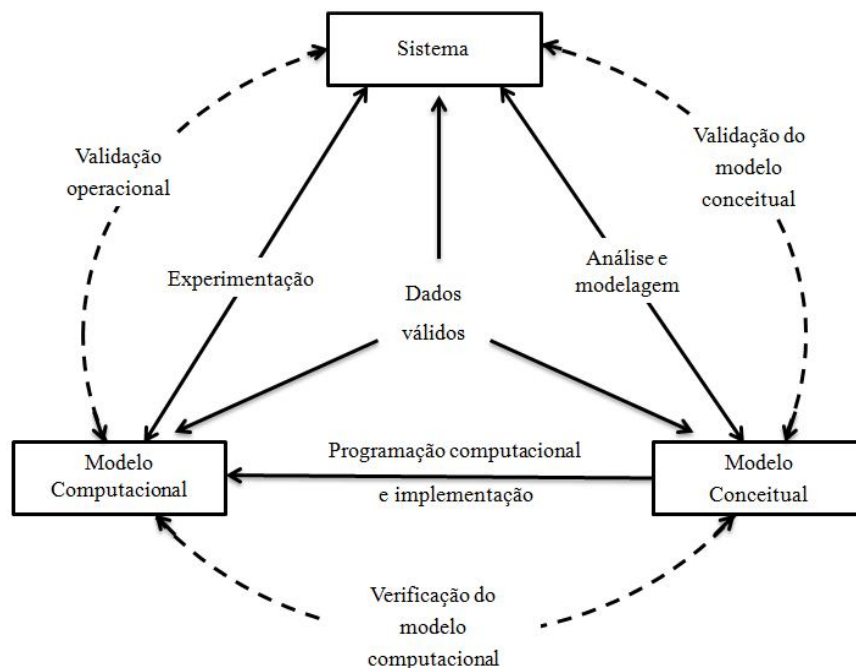


Figura 3.1 – Validação do modelo conceitual e validação operacional

Fonte: Sargent (2009).

Para Chwif e Medina (2007), a pergunta a ser feita na etapa de verificação é: “será que o modelo está sendo desenvolvido corretamente?”.

Existem muitas técnicas ou procedimentos publicados na literatura que podem ser utilizados para facilitar o processo de verificação, ou seja, de retirada de *bugs* do modelo computacional, alguns deles são:

- Implementação modular ou verificação modular: Este é um procedimento comumente utilizado em engenharia de *software* e que também é aplicável em simulação. Consiste em construir o modelo em partes e rodar só esta parte. Se esta parte estiver correta, então, passa-se para a segunda parte e assim sucessivamente (KLEIJNEN, 1995).
- Verificação visual: A animação gráfica da simulação é uma ferramenta bastante útil para identificar erros como, por exemplo, se uma entidade segue a rota errada ou uma entidade simplesmente sai do sistema quando era para ser processada em um local (CHWIF e MEDINA, 2007). Ainda, Robinson (1997) sugere que o modelo seja colocado para rodar e seja parado em determinado evento, então, pode-se prever o que acontecerá após este evento, retomando a rodada, pode-se verificar se o modelo realmente executa o que foi previsto.
- Inspeção de relatórios das saídas do modelo: Consiste em comparar os resultados esperados com os resultados da execução da simulação. Neste sentido, o desempenho de cada elemento do modelo pode ser verificado, por exemplo, o nível de utilização de uma máquina, o nível do estoque em processo ou tempo de reparo de máquinas (ROBINSON, 1997).
- Utilização do *debugger trace* ou depurador: Alguns *softwares* já possuem uma ferramenta que facilita a depuração do modelo, onde é possível acompanhar a execução da simulação “passo a passo” e também visualizar os eventos que estão ocorrendo e eventos futuros, bem como os valores das variáveis do modelo (CHWIF e MEDINA, 2007). Existem *softwares* que também documentam (produzem um relatório) este passo a passo da simulação a fim de facilitar o processo de depuração, como o simulador Promodel[®].
- Valores constantes ou simplificados versus cálculos manuais: De acordo com Chwif e Medina (2007) e Kleijnen (1995), neste procedimento o analista pode utilizar valores

médios de cada distribuição (valores constantes e determinísticos) apenas para facilitar a comparação das saídas do modelo de simulação com resultados calculados manualmente (ou através de planilhas eletrônicas) e observar se eles são coerentes.

Finalmente, as inferências sobre o sistema são obtidas através da realização de experimentos computacionais com o modelo computacional na fase de experimentação. Nessa fase, ocorre a validação operacional que determina se o comportamento da saída do modelo tem a precisão requerida para o objetivo do modelo no domínio de aplicação deste. Isso pode ser obtido através de três abordagens básicas: comparações gráficas de dados, intervalos de confiança e testes de hipóteses (SARGENT, 2009).

Outro conceito importante que está ligado ao processo de V&V é a credibilidade. Segundo Sargent (2009), estabelecer credibilidade para um modelo é desenvolver nos usuários do modelo a confiança que eles requerem para usarem o modelo e as informações geradas pelo mesmo. Para Law (2009), um modelo possui credibilidade quando o modelo e seus resultados são aceitos como “corretos” pelos tomadores de decisões e outras pessoas-chaves para o projeto. Ainda segundo este autor, validade não implica credibilidade e vice-versa.

Segundo Sargent (2009), infelizmente não há um conjunto de testes específicos que podem ser facilmente aplicadas para determinar a “correção” de um modelo. Ainda, segundo o autor, não existe um algoritmo para determinar quais técnicas ou procedimentos devem ser utilizados. Portanto, todo projeto de simulação apresenta um desafio novo e exclusivo para a equipe de desenvolvimento do modelo.

3.2.6 Limitações da Simulação Computacional

Segundo Baines *et al.* (2004), é comum observar que existe uma folga entre o desempenho previsto pelos modelos de simulação a eventos discretos e as saídas que tais sistemas geram no sistema real.

Conforme mencionado anteriormente nesta pesquisa, os modelos de simulação quando comparados ao sistema real tendem a modelar o mundo real de forma otimizada, como apresentado na Figura 3.3.

Carrie (1988) descreve quatro conjuntos de fatores que afetam a precisão da simulação, e que são limitações fundamentais que afetam todos os projetos de simulação. Os fatores são:

- o pressuposto de simplificar o modelo;
- o efeito do comportamento dinâmico;
- o efeito do viés dos números aleatórios utilizados para introduzir variação estocástica;
- precisão dos dados do modelo.

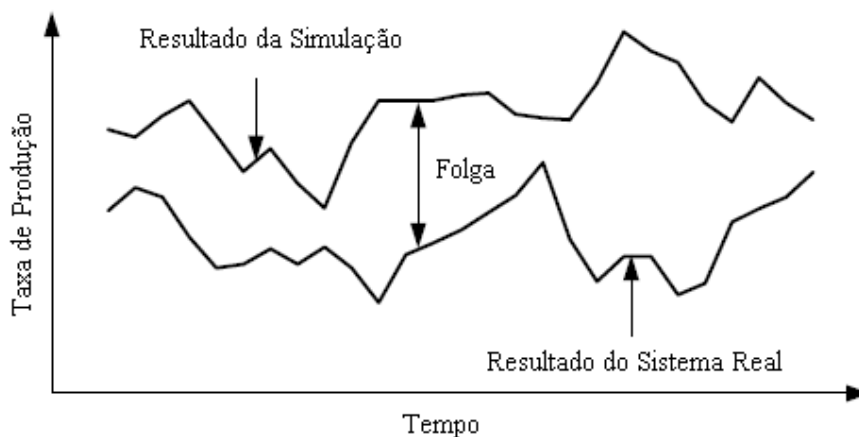


Figura 3.2 - Folga entre o resultado do sistema real e o resultado da simulação

Fonte: Adaptado de Siebers (2004).

Segundo Siebers (2004), devido à complexidade dos sistemas reais, um modelo de simulação é apenas uma cópia restrita do sistema real. Para Robinson (1994), deve-se incluir em um modelo o mínimo de detalhes necessários para se atingir o objetivo do projeto. Por outro lado, o mesmo autor adverte que a simplificação e a abstração de um modelo muitas vezes levam a alguma perda na exatidão e afirma que seria muito útil estimar a extensão dessa perda.

Chun (1997) diz que a coleta dos dados de entrada é um dos principais problemas em um projeto de simulação, devido à falta de precisão e confiabilidade dos dados. Esta opinião é

compartilhada por Sargent (2009), que afirma, neste contexto, que a validade dos dados de entrada é o que controla a qualidade da simulação.

Segundo Baines e Kay (2002), as previsões produzidas pelos modelos de simulação a eventos discretos dos sistemas altamente automatizados são notadamente mais precisas do que as previsões dos sistemas que envolvem operadores diretos (pessoas, dedicadas às rotinas predominantemente manuais). Como consequência, os autores assumem que isso ocorre principalmente pela falta de entendimento das relações entre as pessoas, seu ambiente de trabalho, os efeitos sobre o desempenho subsequente e pela falta de capacidade de modelagem desses.

Segundo Carrie (1998), o comportamento das máquinas e a modelagem desse comportamento têm sido estudados no campo das ciências de engenharia e são bem compreendidas pelos profissionais de simulação. Porém, isso não ocorre com a modelagem do comportamento humano (CHECKLAND, 1981). A pobre representação do comportamento humano pode ser identificada como uma das falhas potenciais da simulação dos sistemas de manufatura (EHRHARDT, HERPER e GEBHARDT, 1994; FREUDENBERG e HERPER, 1998; BAINES e KAY, 2002).

Atualmente, nenhuma ferramenta de simulação a eventos discretos permite uma modelagem mais detalhada do desempenho humano (BAINES e KAY, 2002). Isto se torna um problema ainda maior quando são modelados os sistemas com tarefas predominantemente manuais, como as linhas de montagem (BAINES *et al.*, 2004).

Várias dificuldades a respeito de modelagem do desempenho humano foram identificadas por diversos autores. Bernhardt e Schilling (1997) identificam a complexidade da tarefa como um dos problemas na implementação do comportamento humano dentro das ferramentas de modelagem.

Por fim, Baines e Kay (2002) identificam dois obstáculos que impedem os profissionais de utilizar a riqueza do conhecimento disponível sobre o desempenho e o comportamento dos operadores. Primeiramente, o conhecimento é contextualmente suscetível e pode ser aplicável apenas em determinadas situações. Em segundo lugar, o conhecimento não está disponível em uma forma facilmente utilizável. Checkland (1981) afirma que as pessoas não podem ser precisamente modeladas da mesma forma como os elementos

tecnológicos, já que eles são capazes de ações independentes e são suscetíveis a uma gama muito maior de estímulos e respostas.

3.3 Aplicação da Simulação em um sistema de manufatura

De acordo com O’Kane, Spenceley e Taylor (2000), os modelos de simulação consistem em um dos métodos mais populares e acessíveis, financeiramente, para análise de sistemas industriais complexos, uma vez que métodos tradicionais, modelos matemáticos ou analíticos não são adequados para o entendimento de sistemas de manufatura com diversas operações discretas que ocorrem aleatoriamente e com comportamento não-linear.

De acordo com Bank’s *et al.* (2005), a simulação é uma das ferramentas mais utilizadas em sistemas de manufatura do que em qualquer outra área. Algumas razões são apresentadas a seguir:

- o aumento da produtividade e qualidade na indústria é um resultado direto da automação. Como os sistemas de automação são cada vez mais complexos estes só podem ser analisados pela simulação;
- os custos de equipamentos e instalações são relativamente altos;
- os custos dos computadores estão cada vez mais baixos e os processadores mais rápidos;
- melhorias nos *softwares* de simulação reduziram o tempo de desenvolvimento de modelos. A disponibilidade de animação resultou em maior compreensão e utilização dos gestores da manufatura.

A complexidade dos sistemas de manufatura é função da interdependência entre elementos (cada elemento afeta outro elemento) e da variabilidade do comportamento de cada elemento (incerteza), conforme ilustrado na Figura 3.1. Harrel, Ghosh e Bowden (2004) destacam que estes dois fatores caracterizam virtualmente todos os sistemas onde existem seres humanos, o que torna o comportamento do sistema difícil de analisar e prever. E mais, os mesmos autores afirmam que o grau de dificuldade analítica aumenta exponencialmente à medida que o número de interdependências e variáveis aleatórias cresce.



Figura 3.3 - Definição de um sistema complexo
Fonte: Adaptado de Harrel, Ghosh e Bowden (2004).

Segundo Law e Kelton (2000), talvez o maior benefício da utilização da simulação em um ambiente de manufatura é permitir que um gerente ou engenheiro obtenha uma ampla visão do sistema e do efeito das alterações locais para o sistema de manufatura.

Sendo assim, a simulação tem sido empregada de forma crescente para auxiliar a tomada de decisões através da modelagem, análise e projeto de sistemas complexos a fim de caracterizar o impacto de mudanças de parâmetros no desempenho do sistema (BANKS *et al.*, 2005; GARZA-REYES *et al.*, 2010; SARGENT, 2009).

3.4 Consideração do fator humano nos modelos de simulação

3.4.1 Considerações iniciais

Segundo Baines (1994), os modelos de simulação podem parecer confiáveis enquanto as previsões de desempenho são irreais. Para Baines *et al.* (2005), tais erros dependem de muitos fatores, tais como a competência do usuário e a complexidade do sistema real que está sendo modelado. Supõe-se que os operadores dentro das fábricas são altamente previsíveis e padronizados em seu comportamento. Por exemplo, os construtores dos modelos (que são frequentemente engenheiros), tendem a assumir que os operadores sempre iniciam o trabalho na hora prevista, operam a uma taxa constante durante o dia, fazem as paradas conforme o planejado, etc.

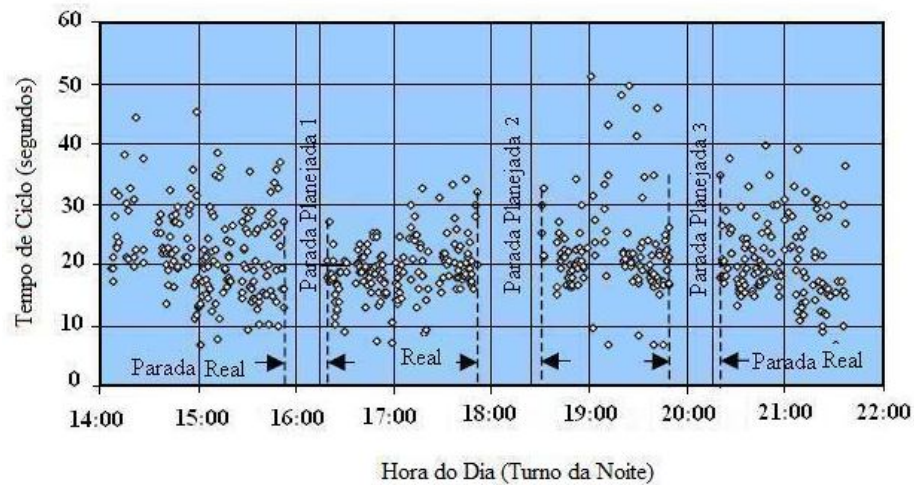
Segundo Baines *et al.* (2004), o conceito de “recurso” é limitado na sua aplicação para a modelagem do comportamento e desempenho humano. Este problema é especialmente

agudo quando a modelagem é realizada em um sistema com uma elevada proporção de trabalho manual tal como em uma linha de montagem. Para Furnham, Forde e Ferrari (1999), o desempenho de um indivíduo varia dependendo de fatores como a sua capacidade, formação e educação, juntamente com as características fisiológicas e psicológicas. O ambiente físico e organizacional criado pelo projetista também afetam o desempenho humano.

Segundo Baines *et al.* (2004), os engenheiros desconhecem os comportamentos e necessidades sociais, psicológicas e fisiológicas dos operadores com os quais eles interagem. Para esses autores, a inclusão dos modelos de desempenho humano na simulação a eventos discretos fornecem uma oportunidade para que os projetistas dos sistemas conheçam a importância e o impacto que os fatores humanos têm sobre seus projetos.

Segundo Siebers (2004), uma forma comum de representar o desempenho dos operadores nos modelos de simulação que representam sistemas de manufatura é utilizar o tempo padrão. Este é o tempo requerido por um operador qualificado médio, trabalhando em um lugar normal, para desenvolver uma tarefa específica utilizando um método específico, considerando o tempo para as necessidades pessoais, fadiga e atraso. Para esse autor, usar valores médios e ignorar a variação natural no tempo de processamento dessas tarefas representa uma significativa simplificação que impacta fortemente no comportamento dos modelos de simulação e conseqüentemente na precisão das previsões de desempenho desses modelos.

Para ilustrar a variabilidade ocorrida no desempenho do operador, a Figura 3.4 identifica uma série de tempos que ilustra como o desempenho do tempo de ciclo de uma estação de trabalho manual varia. Esses tempos de ciclo foram originados de uma linha de montagem real dentro de uma organização automotiva do Reino Unido.



¹Figura 3.4 – Variação no tempo de ciclo em uma estação de trabalho manual

Fonte: Adaptado de Baines *et al.* (2005).

Os dados da Figura 3.4 foram gerados eletronicamente durante 12 semanas, visto que cada operador executa suas atividades em um turno de 8 horas de produção. Cada ponto de dados mostra o desempenho do tempo de ciclo de um operador individual, e cada *cluster* representa diferentes agentes na estação de trabalho. Consequentemente, a série de tempos mostra em que medida o desempenho individual dos operadores varia e, além disso, mostra que o desempenho também varia entre os operadores, para uma estação típica de trabalho em um turno de 8 horas. Também ficam evidentes no gráfico os tempos de parada dos operadores que variam daqueles planejados, quando comparados com os tempos de paradas reais. A análise dos dados sugere que até um terço do tempo potencial de produção é perdido, devido às paralisações, paradas prolongadas e interrupções que ocorrem nas linhas, muitas das quais são causadas pelo comportamento do operador.

¹ Nota: Cada ponto de dados representa o tempo de ciclo real gravado para a operação de um trabalhador. Os trabalhadores mudam de tarefa aproximadamente a cada hora, o que significa dizer que os pontos de dados mostrados na primeira hora são referentes a uma pessoa diferente que os pontos de dados mostrados na segunda hora e assim por diante durante o período de 8 horas.

3.4.2 Desenvolvimento da Modelagem Humana

Segundo Baines *et al.* (2005), uma melhoria desejável na simulação seria uma representação mais realista das variações no desempenho humano e dos fatores humanos que influenciam estas variações. Baines e Kay (2002) mostram como a capacidade de modelagem pode ser melhorada através da integração de uma ferramenta de modelagem do desempenho humano com a simulação computacional, para apoiar os projetos dos sistemas de manufatura, como mostrado na Figura 3.5.

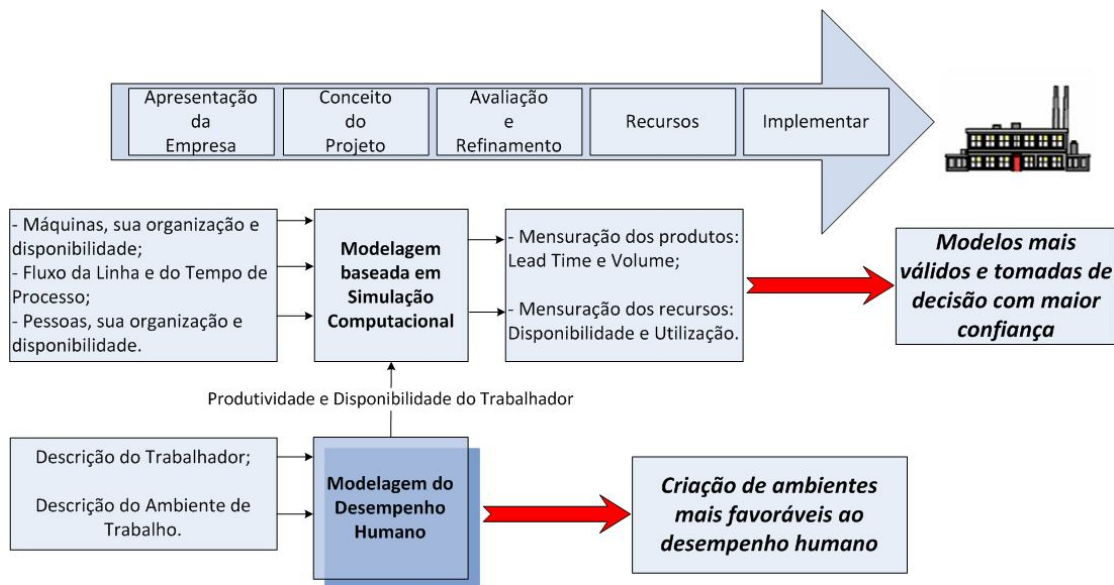


Figura 3.5 - Modelagem do desempenho humano como um auxílio no projeto dos sistemas de manufatura.

Fonte: Adaptado de Baines e Kay (2002).

O desenvolvimento dessa integração oferece dois principais benefícios. Primeiro, possibilita a criação de modelos de simulação mais precisos, o que permite que decisões de investimentos sejam tomadas com maior confiança. Segundo, por permitir uma maior consideração dos fatores humanos no início do projeto dos sistemas de manufatura, isto faz com que os projetistas criem ambientes de trabalho mais favoráveis aumentando o desempenho da força de trabalho (BAINES *et al.* 2005).

No entanto para Bruzzone *et al.* (2007), quando se pretende desenvolver análises mais detalhadas sobre aspectos do comportamento humano em um modelo de simulação, isso certamente envolverá custos adicionais e sua viabilidade econômica deverá ser avaliada.

3.4.3 Identificação dos fatores humanos

Para Digiesi *et al.* (2009), o comportamento de um operador pode ser afetado por vários fatores tais como o ambiente de trabalho (físico: micro-clima, ergonomia, ruído; social: relações humanas, comunicação entre o grupo), a natureza da tarefa (discreta ou contínua, repetitiva ou não-repetitiva, motora ou cognitiva e fatores pessoais (atitudes psicofísicas, habilidade pessoal, idade, sexo). Segundo esses autores, estes fatores podem influenciar profundamente o comportamento de um operador, o que pode resultar em uma variabilidade de desempenho durante o turno de trabalho. Essa variabilidade nos tempos de conclusão de tarefas pode ser observada se a tarefa é completada pelo mesmo operador em diversos contextos de produção, bem como se a tarefa é executada no mesmo ambiente de trabalho (ambiente físico e social) e no mesmo local de trabalho.

Segundo Baines *et al.* (2005), melhorar a simulação não é simplesmente um desafio para a tecnologia da informação e da comunidade de programação computacional. O desafio consiste em compreender exatamente onde a variação no desempenho humano deve ser considerada em um modelo de simulação do sistema de manufatura, para que seja possível analisar a natureza dessa variação e identificar os fatores que afetam e intensificam esta.

Segundo Baines *et al.* (2005), atualmente existe uma variedade de quadros teóricos e, embora nenhum deles seja adaptado para o desafio de modelagem do desempenho humano, eles oferecem uma visão geral valiosa das teorias.

Nas Tabelas 3.2a e 3.2b foram apresentadas uma coleção multidisciplinar de teorias que mostram como uma ampla gama de fatores físicos e psicológicos inter-relacionados tem sido relacionada aos resultados do desempenho relativos ao operador, à organização e ao ambiente de trabalho. Além disso, são demonstradas na tabela, as tentativas realizadas para integrar os fatores dentro das teorias para modelagem e simulação do desempenho humano.

Tabela 3.2a - Quadro teórico relacionado ao desempenho e fator humano

Autores	Teoria	Sinopse	Aplicação
Lewin (1935).	Teoria do campo	Descreve o comportamento humano determinado pela interação entre os fatores individuais e o ambiente físico.	Entendimento geral do comportamento humano.
Miller e Swain (1987).	Fatores e Modelagem do Desempenho	Inventário dos fatores ambientais, individuais e organizacionais que predisõem os operadores industriais a erros.	Pesquisa/Prática do Erro humano.
Furnham (1992).	Fatores prevendo o comportamento organizacional	Previsão de 05 categorias básicas de fatores individuais (personalidade, inteligência, demográfica, motivação e habilidade) relacionadas ao comportamento ocupacional.	Pesquisa/Prática (geral).
Stone e Eddy (1996).	Fatores que afetam a qualidade relacionada aos resultados	Modelos de relacionamentos dos fatores relacionados ao indivíduo e à organização.	Melhoria do trabalho para os sistemas TQM.
Dahn e Laughery (1997).	Modelagem do desempenho integrado	Desenvolvido para a modelagem da contribuição humana para o desempenho do sistema.	Modelagem do desempenho humano Aplicação militar/industrial.
Bunting e Belaying (1999).			

Tabela 3.2b - Quadro teórico relacionado ao desempenho e fator humano

Autores	Teoria	Sinopse	Aplicação
Ichniowski e Shaw (1999).	Gestão do recurso humano/ Práticas e Produtividade	Foco nos fatores organizacionais; Conjunto de técnicas de gestão de recursos humanos das firmas japonesas; Abrange apenas as técnicas de gestão de recursos humanos e não contempla outros fatores organizacionais e físicos.	Produtividade global do Japão e US
Bonney et al. (2000).	Quadro teórico do projeto do sistema de manufatura	Produtos integrados, projetos do processo e sistema pela ênfase das considerações dos fatores humanos.	Sistemas computadorizados de manufatura baseados no <i>software</i> de projetos
Schmidt (2000).	Condições físicas, estado emocional, capacidade cognitivas, status social	Agente baseado na modelagem do quadro físico, emocional, cognitivo e social, efeitos do desempenho do grupo.	Modelagem do desempenho humano dos sistemas sociais
Parker, Wall e Cordery (2001).	Modelo elaborado do projeto de trabalho	Especificação de cinco categorias de variáveis do projeto de trabalho que abrangem as variáveis grupais e organizacionais.	Projeto de trabalho contemporâneo
Toriizuka (2001).	Definição dos fatores de desempenho para manutenção da planta industrial	Inventário dos fatores que influenciam a confiabilidade humana, a eficiência de trabalho e carga de trabalho.	Melhoria do trabalho de manutenção das tarefas nas plantas industriais

Fonte: Adaptada de Baines et al. 2005.

Segundo Baines *et al.* (2005), embora este quadro forneça uma excelente ilustração dos fatores e categorias que precisam ser contabilizadas, é demasiado vago e amplo para direcionar a aplicação. Bonney *et al.* (2000) enfatiza a centralidade dos operadores diretos para projetar os resultados em seu quadro, mas não especificam os fatores humanos que devem ser considerados. Por outro lado, os modelos mais elaborados, por exemplo, Das (1999) e Parker, Wall e Cordery (2001) apresentaram variáveis muitas vezes indefiníveis e intangíveis que seriam difíceis de quantificar ou avaliar na prática. Uma característica regular destes quadros é que eles se esquecem de considerar plenamente os aspectos do ambiente físico, o que pode ser uma consideração importante dentro de muitas fábricas.

O modelo de Furnham (1992) propõe cinco categorias básicas de fatores individuais (personalidade, inteligência, demografia, motivação e habilidade) que influencia geralmente o comportamento profissional. No entanto, por não contabilizar os efeitos dos fatores externos (organizacional e ambiental), ou especificar a natureza dos fatores dentro dessas categorias (por exemplo, o tipo de personalidade, sexo, QI, etc.), o modelo não pode ser extrapolado para representar os desempenhos específicos, antecedentes ou que estão por vir. Portanto, é de uso prático limitado na representação do desempenho individual em contextos específicos, tais como os sistemas de manufatura (BAINES *et al.* 2005).

Em relação aos modelos que estão relacionados ao sistema de manufatura, o levantamento bibliográfico de Miller e Swain (1987) aborda uma série de fatores relevantes, tais como os ambientais, organizacionais e individuais. No entanto, estes são apenas considerados em relação à taxa de erro relacionada ao desempenho. Toriizuka (2001) elaborou a teoria proposta por Miller e Swain (1987) para melhorar o estilo, a eficiência e o conforto do trabalho. Porém, este modelo é específico para tarefas de manutenção, que possui características próprias. Da mesma forma, embora os fatores identificados por Stone e Eddy (1996) sejam relevantes para o contexto de manufatura, as teorias desenvolvidas por eles são específicas para os resultados de desempenho relacionados com a qualidade. Este modelo também não leva em conta os fatores ligados ao ambiente físico.

Um quadro teórico que foca especificamente nos fatores organizacionais, foi desenvolvido por Ichniowski e Shaw (1999). Esses autores identificaram uma série de técnicas de gestão dos recursos humanos, consideradas típicas da indústria japonesa (rotação do trabalho, comunicação, orientação, sistemas de pagamentos, equipes de trabalho,

recrutamento, seleção e treinamento). A partir daí, eles utilizaram a análise de regressão para relacionar o uso dessas práticas para a produção, porém as desvantagens dessa teoria são a inclusão apenas dessas práticas de gestão dos recursos humanos, ignorando outros fatores ambientais organizacionais e físicos, e, além disso, as medidas de desempenho estão relacionadas ao desempenho geral das linhas e não ao comportamento dos operadores individualmente.

Esses quadros teóricos apresentados anteriormente exemplificam a necessidade de se criar um quadro simples, que agrupa a multiplicidade de fatores humanos que precisam ser considerados em sistemas de manufatura. Parker, Wall e Cordery (2001) afirmam que a lista universal de fatores humanos que precisam ser considerados em sistemas de manufatura seria infinita, mas que é possível identificar as categorias de variáveis em um quadro global de orientação teórica que podem ser adaptadas e aplicadas de forma diferente de acordo com o contexto.

A pesquisa desenvolvida por Baines *et al.* (2005) teve como objetivo elaborar um quadro teórico que permitisse uma modelagem do desempenho humano dentro do projeto de um sistema de manufatura. Num primeiro estágio, o escopo da pesquisa foi limitado aos operadores diretos, pessoas que executam as tarefas manuais dentro da produção, consideradas críticas para o desempenho geral da linha. Para atingir o objetivo, duas questões foram respondidas:

- Quais são as atividades adequadas aos operadores diretos e as respectivas medidas de desempenho que o quadro teórico deveria basear-se?
- Quais os fatores mais prováveis de influenciar essas medidas de desempenho?

Assim, a primeira etapa da pesquisa desenvolvida por Baines *et al.* (2005), foi determinar quais as medidas de desempenho relacionadas aos operadores diretos, em outras palavras, onde dentro de um modelo de simulação de um sistema de manufatura deve ser considerada uma distribuição do desempenho humano?

Segundo Baines *et al.* (2005), quando a precisão do modelo é crítica, é necessária uma previsão mais realista do desempenho humano. Diante disso, os autores sugerem que as seguintes considerações sobre o desempenho humano devem ser analisadas:

- Distribuição de confiabilidade: Dadas todas as condições para o operador iniciar a tarefa, quais atrasos ocorrem antes do operador responder as instruções para iniciar o trabalho.
- Distribuição do tempo da atividade: Depois de um operador iniciar a tarefa, como o tempo da atividade varia?
- Distribuição da taxa de erro: Como um operador pode executar uma atividade com exatidão e confiabilidade? Os erros são quaisquer desvios da especificação do produto, que podem resultar em produtos inservíveis, ou produtos que requerem processamento adicional para se tornarem servíveis (retrabalho).
- Taxa de Absenteísmo: Com qual frequência um operador participa do trabalho ao longo de um período?
- Taxa de Acidentes: Com qual nível de segurança um operador executa sua atividade?
- Taxa de rotatividade: Com qual constância o operador está envolvido?

A partir daí, observaram-se seis importantes variações no desempenho humano, que deveriam ser consideradas em um modelo de um sistema de manufatura.

A segunda etapa da pesquisa foi identificar os principais fatores relacionados que são mais susceptíveis de causar variação nos seis indicadores de variação de desempenho humano.

O ponto de partida para a investigação dos fatores foi baseado na teoria de Lewin (1935), em que o comportamento individual é resultado de um sistema dinâmico, e os fatores relacionados ao indivíduo interagem com elementos do ambiente como mostrado na Figura 3.6. Para orientar esta análise, a revisão de literatura foi estruturada em torno de elementos relativos ao indivíduo e ao ambiente de trabalho e após a conclusão desta análise, os fatores e medidas de desempenho foram reunidos para formar o quadro teórico.

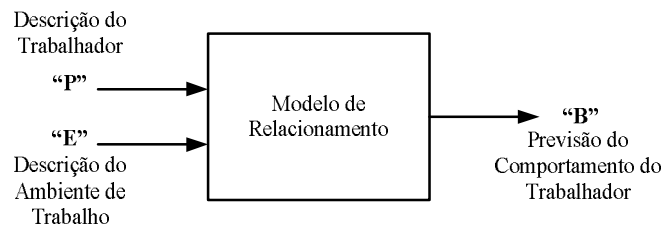


Figura 3.6 - Teoria da Personalidade Dinâmica

Fonte: Adaptada de Lewin (1935).

Baines *et al.* (2005), identificaram quais os fatores chaves causam as variações no desempenho humano, através de uma revisão de literatura em diversas áreas tais como gestão da produção, psicologia aplicada, psicologia social, ergonomia, fatores humanos, medicina comportamental, economia, relações industriais, gestão de recursos humanos e psicologia ocupacional. Para a seleção dos fatores foi realizada uma revisão da literatura pertinente de mais de 800 referências, e em seguida aplicou-se um método de triagem, segundo os quatro critérios abaixo:

- Relevância geral: Existe evidência que os fatores considerados estão relacionados com o desempenho das pessoas que exercem atividades manuais e repetitivas?
- Relevância específica: O fator está relacionado ao trabalho manual e/ou está diretamente relacionado à variação de desempenho humano?
- Robustez: A literatura é consistente em termos do impacto do fator? São citadas as fontes confiáveis, baseados em estudos empíricos de credibilidade e robustos?
- Mensurabilidade: O fator pode ser avaliado com segurança?

Assim, a seleção identificou um total de 65 potenciais fatores para serem incluídos na estrutura teórica. Esses foram divididos em três categorias:

- Fatores relacionados ao operador individual: personalidade, demografia, fisiologia, cognição, motivação e habilidades.
- Fatores relacionados ao ambiente físico: ruído, vibração, luz e qualidade do ar interior (incluindo a temperatura e a umidade).

- Fatores relacionados a estruturas organizacionais, culturais e práticas de recursos humanos: turno de trabalho, hierarquia organizacional, políticas relacionadas à capacitação do operador (equipe de trabalho, formação e recrutamento).

Os fatores chaves encontrados estão apresentados nas Tabelas 3.3a e 3.3b.

²Tabela 3.3a - Seleção dos fatores humanos chaves que afetam o desempenho humano

Classificação	Variáveis individuais	Ambiente físico	Ambiente organizacional
15	-	-	Turno de trabalho
14	Habilidades cognitivas	-	Equipe de trabalho
14	Consciência	-	-
13	Extroversão	-	Manutenção
13	Neuroticismo	-	Treinamento
12	Compromisso organizacional	Nível de ruído	Rotação do trabalho
12	Satisfação no trabalho	Temperatura do ar	Comunicação
12	Idade	-	-
11	Atitudes, crenças e valores	-	Diversidade
11	Ética no trabalho	-	-
10	Objetivos	-	Estrutura hierárquica
10	-	-	Clima
9	Socialização	Nível de luminosidade	-
9	Abertura	Umidade	-
9	Gênero	Ventilação	-
9	QI	-	-
9	Lócus de Controle	-	-
9	Habilidade, Experiência	-	-
8	Estilo de vida	Monóxido de carbono	Liderança

² Nota: A pontuação do ranking é calculada pela soma dos escores (0-4) atribuídos a cada variável para cada um dos quatro critérios (relevância geral, a relevância específica, robustez e mensurabilidade). Variáveis nas três áreas são, então, ordenados de acordo com esta pontuação. A área destacada (em negrito) mostra as variáveis que foram incluídas no quadro teórico, e a área sem destaque (sem negrito) mostra as variáveis que foram rejeitadas do mesmo.

³Tabela 3.3b - Seleção dos fatores humanos chaves que afetam o desempenho humano

Classificação	Variáveis individuais	Ambiente físico	Ambiente organizacional
8	Padrões de sono	Ozônio	Sistemas de Pagamento
8	-	-	Recrutamento
8	-	-	Segurança do funcionário
7	Saúde	Frequência da Vibração	-
7	Biorritmo	Luz diária	-
7	Ritmo circadiano	Dióxido de carbono	-
6	Status da família	Frequência de ruído	-
6	Educação	Oxigenação	-
5	Resistência de força	Frequência da luz/ coloração	-
5	Atenção	-	-
5	Concentração	-	-
4	SES	Duração do ruído	-
4	Etnia	Iluminação/brilho	-
4	Esquemas	Iluminação/reflexão	-
4	Religião	-	-
4	Adaptabilidade	-	-
3	Dieta	Previsibilidade ruído/ constância	-
1	Agilidade/Destreza	-	-
1	Analítica/Criativa	-	-
1	Forma	-	-

Fonte: Adaptado de Baines *et al.* (2005).

Segundo Baines *et al.* (2005), a variável organizacional considerada mais importante é o trabalho por turnos, cujos efeitos são documentados por uma literatura considerável, e pode ser medida comparando as variações de produtividade entre diferentes turnos. A variável

³ Nota: A pontuação do ranking é calculada pela soma dos escores (0-4) atribuídos a cada variável para cada um dos quatro critérios (relevância geral, a relevância específica, robustez e mensurabilidade). Variáveis nas três áreas são, então, ordenados de acordo com esta pontuação. A área destacada (em negrito) mostra as variáveis que foram incluídas no quadro teórico, e a área sem destaque (sem negrito) mostra as variáveis que foram rejeitadas do mesmo.

equipe de trabalho também é importante e os efeitos podem ser medidos através da diferença de produtividade entre as equipes.

De posse dos sessenta e cinco fatores potenciais identificados, Baines *et al.* (2005) realizaram um julgamento subjetivo, especialmente pelo fato da atribuição de valores para os escores e para o *ranking*. No entanto, o processo foi revisto por membros de uma equipe de investigação, ao invés de um único indivíduo. Assim, o inventário de fatores de classificação, ainda constou de sessenta e cinco variáveis potenciais, que foi considerada demais para a inclusão em um quadro teórico, e assim, o *ranking* foi examinado cuidadosamente e estabeleceu-se um ponto de corte procurando agrupamentos naturais, especialmente contra os critérios de relevância e mensurabilidade. Desta forma, trinta principais fatores foram finalmente identificados e estes estão apresentados na área destacada das Tabelas 3.3a e 3.3b.

Os fatores chaves identificados por esse processo proporcionam uma visão abrangente dos fatores que podem influenciar os operadores diretos. Assim, o quadro teórico derivado de Lewin (1935) como ilustrado na Figura 3.6, foi primeiramente expandido pela utilização das três categorias de fatores potenciais centrados no ser humano e depois pela utilização das medidas de desempenho identificadas acima. O quadro teórico proposto por Baines *et al.* (2005) está ilustrado na Figura 3.7.

O quadro teórico apresentado na Figura 3.7 oferece uma representação qualitativa dos determinantes do desempenho humano. O elemento final do quadro teórico é o conjunto de funções, que descreve os efeitos das mudanças das variáveis chaves nas medidas de desempenho. Segundo Baines *et al.* (2005), embora alguns desses relacionamentos possam ser encontrados na literatura (por exemplo, o impacto da idade no tempo de ciclo), sua natureza precisa ainda precisa ser estabilizada.

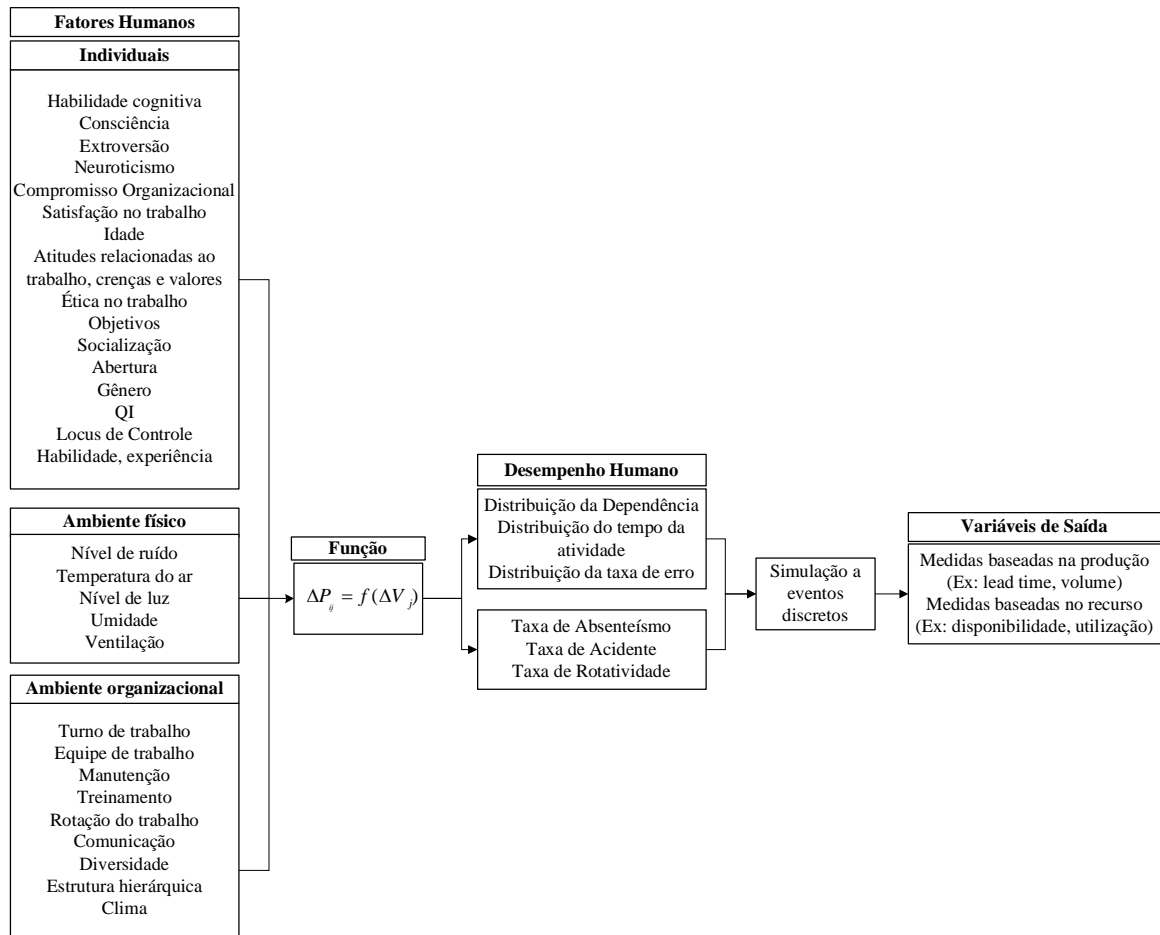


Figura 3.7 - Quadro teórico da modelagem do desempenho humano

Fonte: Adaptado de Baines *et al.* 2005.

Segundo Baines e Benedettin (2007), em uma abordagem prática de modelagem do desempenho humano, deve-se se concentrar em um número menor de medidas de desempenho, já que quanto maior o número de medidas de desempenho, maior será o número de relações a serem investigadas sobre os fatores de entrada. Esses autores sugerem que o ideal é priorizar as medidas de desempenho que impactam no desempenho do sistema que está sendo analisado.

Ainda segundo Baines e Benedettin (2007), alguns fatores apresentados no quadro teórico de Baines *et al.* 2005 devem ser revistos, como por exemplo, as condições do ambiente físico de trabalho, uma vez que essas condições são impostas pelo Ministério da

Saúde e pelas Normas de Segurança. Porém, vale ressaltar que cada sistema deve ser analisado de forma particular.

Segundo Vincenzi *et al.* (2009), em qualquer sistema em que o elemento humano participe da execução das tarefas, é possível considerar fatores humanos nos modelos de simulação. De acordo com esses autores, em sistemas que consideram variáveis de entrada relacionadas ao fator humano, os efeitos ocasionados por essas variáveis podem ser medidos ou controlados, incluindo a fadiga, treinamento, carga de trabalho, acidentes, e estresse. As medidas de desempenho utilizadas para avaliar esses efeitos são a produtividade, taxa de erros, comprimento das filas, tempo de espera, eficiência e a sobrecarga do trabalho humano.

3.4.4 Trabalho em turnos

Desde os tempos mais remotos, o trabalho em turnos já existe. No entanto, sua intensificação começou no início do século XIX, quando a moderna tecnologia viabilizou a realização de muitas atividades produtivas durante todo dia, criando assim a chamada sociedade vinte e quatro horas (ROSA e COLLIGAN, 1997).

Para Biggi *et al.* (2008) o trabalho em turnos tornou-se muito comum na indústria, para flexibilizar a força de trabalho necessária para otimizar a produtividade e a competitividade exigida pelo mercado. Segundo Berger e Hobbs (2006) os turnos de trabalho podem ser fixos ou rotativos, em regime de turnos ou de plantão.

Segundo Oliveira *et al.* (2006), tendo em vista a crescente incidência dessa modalidade de organização do trabalho em nossa realidade e os possíveis riscos a que expõe o operador, é importante que se conheçam as condições do trabalho em turnos e suas influências no cotidiano do operário metalúrgico, principalmente no desempenho humano. Esse conhecimento é imprescindível para que se possam aperfeiçoar as diversas formas que esse tipo de jornada assume e para se planejar uma assistência preventiva contra os possíveis distúrbios na saúde física e mental desses operadores.

Segundo Berger e Hobbs (2006), a alteração do biorritmo do operador para se adaptar a um novo regime de trabalho pode causar alterações na qualidade de vida do operador, à medida que rompe com os ciclos biológicos.

Adicionalmente, Sand *et al.* (2001) afirmam que quando uma pessoa trabalha à noite e passa a dormir durante o dia, pode ser conduzida à dessincronização interna, pois existem características comportamentais, genéticas e fisiológicas associadas aos perfis cronobiológicos. Constata-se ainda, que a privação do sono é fonte de estresse com consequente redução no desempenho e produtividade no trabalho, favorecendo a ocorrência de acidentes e incidentes (MALIK e KAPLAN, 2005).

Para Oliveira *et al.* (2006), o trabalho noturno seja permanente ou alternante, é uma das formas que assume o trabalho em turnos. Para Waidele (1996) o turno noturno é definido como qualquer emprego regular que se realiza fora do horário habitual de trabalho, definido arbitrariamente entre sete e dezoito horas.

Nesse tipo de organização do trabalho, a mesma atividade é executada em diferentes períodos do dia e da noite por vários empregados em igual jornada. Os turnos podem ser organizados em sistemas dos mais variados, a depender das necessidades. Há os sistemas alternados (também chamado de rodízio) e os permanentes. No alternado, as mesmas equipes de trabalho se alternam em turnos da manhã, da tarde ou da noite. Nos sistemas permanentes, as pessoas trabalham em determinado horário (diurno, vespertino ou noturno) por muitos anos ou por toda a vida de trabalho (OLIVEIRA *et al.* 2006).

Segundo Waidele (1996), a sociedade está organizada, predominantemente, para o trabalho diurno, e não existe consciência da necessidade de proteger o descanso do operador noturno, o que acaba comprometendo a qualidade do sono. O sono diurno oferece menor possibilidade de recuperação do desgaste, portanto, há um acúmulo de cansaço que pode se tornar um estado de fadiga constante, constituindo-se assim, em risco de surgimento de enfermidades (OLIVEIRA *et al.* 2006).

Para Carvalho (1990), o sono é uma função vital e regeneradora do nosso organismo, pois é responsável pela manutenção do estado de vigília, organizando os ritmos biológicos e, desta forma, reestabelecendo o corpo do desgaste físico.

Segundo Rodrigues (1998), por ter período de um dia, o ciclo circadiano é o mais importante dos ciclos biológicos para os operadores em turno. Cientistas descobriram que em sintonia com o ciclo biológico o cérebro envia sinais para vários centros de controle do organismo humano, afetando a temperatura corporal, a liberação de hormônios, as habilidades cognitivas e a predisposição para dormir ou se manter em vigília. Ainda segundo o mesmo

autor, o ciclo circadiano apresenta três características principais: é endógeno, resiste a mudanças bruscas e pode se adaptar lentamente.

Segundo Fischer (1990), as três fontes principais de dificuldades advindas do trabalho em turnos são:

- adaptação dos ritmos biológicos às inversões dos períodos de atividade e repouso;
- perturbações do sono;
- fatores domésticos e sociais.

Vários autores, a partir da análise de dados empíricos, propuseram modelos teóricos que explicam as interações entre as variáveis dependentes e independentes que atuam nos processos de trabalho em turnos e que podem resultar em doenças. Dentre os modelos apresentados, optou-se por reproduzir neste trabalho o modelo Knutsson, apresentado na Figura 3.8 (KNUTSSON, 1989).

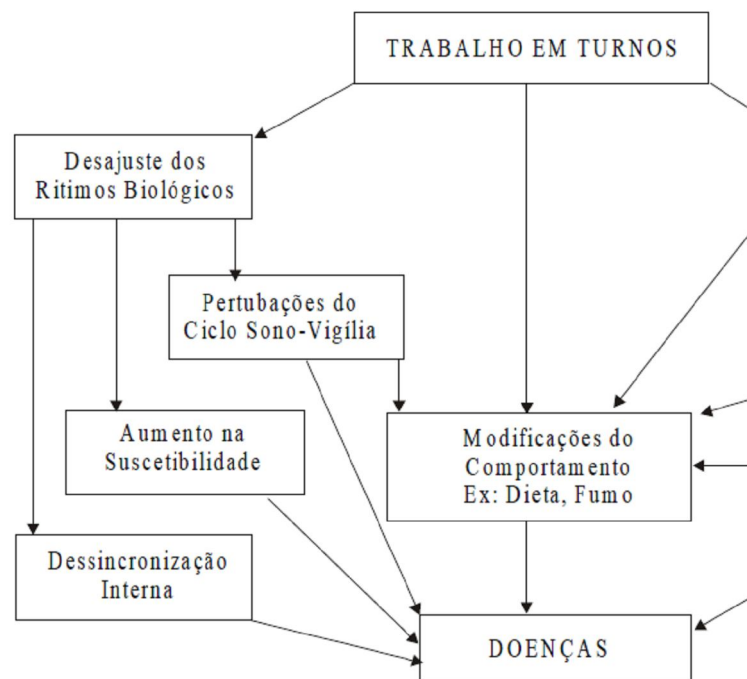


Figura 3.8 - Modelo de KNUTSSON

Fonte: Knutsson (1989).

Segundo Rodrigues (1998), dentre as vantagens do trabalho em turnos, podem ser citadas os adicionais salariais, a possibilidade de se obter agenda mais favorável para cuidar da família ou de projetos pessoais como estudar, o trabalho com menor supervisão, o uso de trajas mais confortáveis e menos formais, a possibilidade de frequentar estabelecimentos comerciais, esportivos, artísticos, etc, em horários de menor movimento e o espírito de grupo que desenvolve em certos casos. Muitos operadores preferem o turno da noite pela maior liberdade em termos de atitudes e ritmo de trabalho, sendo que alguns se tornam mais produtivos e criativos neste turno.

Segundo Beersma e Gordyn (2007), a espécie humana é regida por hábitos diurnos, ao se quebrar esse padrão, principalmente quando do trabalho em turnos noturnos o organismo humano sofre influência direta do ciclo circadiano. Estudos conduzidos por Conway *et al.* (2008), Sokoian e Pirola (2009) e Yamada *et al.* (2001) mostram que funcionários que trabalham em turnos noturnos apresentam um tipo de alteração do sono onde a relação claro-escuro, o sono e a alimentação se tornam dessincronizados.

3.4.5 Modelos de desempenho humano

Nesse tópico foram apresentados três modelos de desempenho humano. Os dois primeiros modelos foram desenvolvidos por Spencer (1987) e por Warr (1995), respectivamente. O terceiro modelo foi desenvolvido por Mummolo *et al.* (2004).

Segundo Baines *et al.* (2004), a seleção dos modelos relacionados ao ritmo circadiano e à idade foi baseada em três critérios a seguir:

- O modelo deve ser válido no contexto em qual ele foi derivado originalmente.
- Deve haver literatura suficiente para indicar que o fator representado pelo modelo está presente em um contexto de manufatura.
- Os dados necessários para o modelo devem ser fáceis de serem obtidos.

Segundo Hackman e Oldham (1976), geralmente, podem ser identificados dois tipos de modelos de desempenho humano na literatura. Os modelos de fatores de nível alto costumam lidar com interações complexas de mecanismos psicológicos. Por exemplo, a

satisfação no trabalho é conhecida por impactar o desempenho no trabalho, mas é mediada por fatores psicológicos e ambientais. Segundo Baines *et al.* (2004), tais modelos são inerentemente complexos, ocorrem em um contexto específico e dependem das diferenças individuais entre as pessoas. A combinação da baixa validade contextual e a grande complexidade faz com que esses modelos sejam inadequados para a simulação desses modelos no sistema de manufatura.

Já para Stirling e Parsons (2000), os modelos de nível baixo representam os mecanismos básicos fisiológicos. Em contraste com os modelos de nível alto, tais modelos são relativamente simples e podem ser aplicados a qualquer indivíduo, e, portanto, são adequados para a simulação (BAINES *et al.* 2004).

3.4.5.1 Teoria do desempenho relacionada ao ritmo circadiano

Para Reilly, Atkinson e Waterhouse (2000), os ritmos biológicos se referem às mudanças cíclicas que se repetem regularmente em um determinado tempo e estão relacionadas às alterações dos processos fisiológicos. Os ritmos podem ser denominados de circadiano, ou seja, referentes ao dia solar (24 +/- 4 horas), ultradiano (ciclos com menos de 24 horas) ou infradiano (ciclos com mais de 28 horas).

A principal função do ritmo circadiano é preparar o corpo humano para o sono através da regulação hormonal de suas funções básicas. Até certa hora da noite, tipicamente entre as 22h30min às 01h00min, o corpo naturalmente adormece. Isso é usualmente acompanhado por uma redução na temperatura central e por um aumento na melatonina (o hormônio do sono) (BAINES *et al.*, 2004).

Segundo Baines *et al.* (2004), o modelo de desempenho relacionado ao ritmo circadiano considera um fator de nível baixo. O modelo apresentado nesse tópico, foi desenvolvido por Spencer (1987), que estudou 30 estudantes em um período de nove dias. No trabalho de Baines *et al.* (2004), esse modelo foi utilizado para representar as mudanças ocorridas no desempenho do operador devido aos efeitos do ritmo circadiano.

Foram incluídas a “hora do dia” e a “hora que a pessoa acorda” para prever o desempenho dos operadores que começam suas atividades em horários diferentes do dia. O

desempenho da tarefa utilizada no estudo, a substituição do símbolo digital da tarefa (DSST) é previsto para a “hora do dia”, T, e a “hora que a pessoa acorda”, t, pela Equação 01. O resultado para um operador que acorda 3 horas antes de começar cada turno de trabalho é apresentado na Figura 3.9. A Equação 1 representa a variação no tempo da atividade para um operador que esteja executando qualquer tarefa.

$$DSST(T, t) = 233,3 + 1,54 t - 0,304 t^2 + 0,0108 t^3 + 4,97 \cos\left(2 \pi \frac{(T - 17,05)}{24}\right) \quad (1)$$

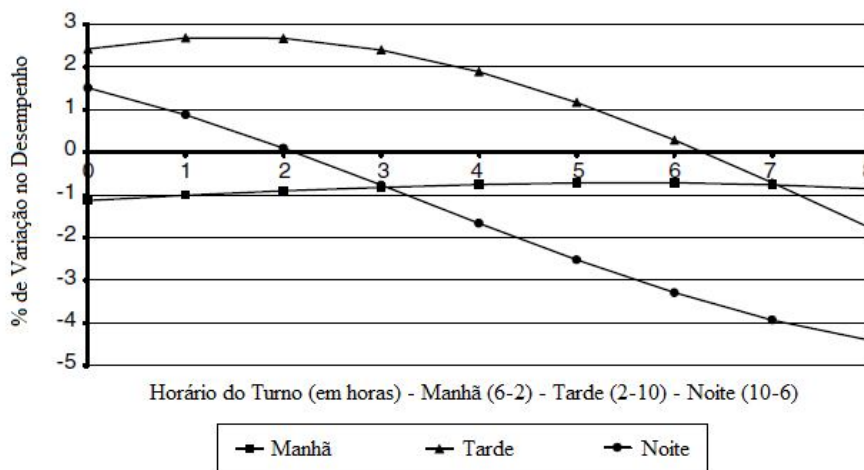


Figura 3.9 - Modelo de desempenho humano relacionado ao ritmo circadiano
 Fonte: Baines *et al.* (2004).

3.4.5.2 Teoria do desempenho relacionada à idade

Segundo Baines *et al.* (2004), o modelo de desempenho relacionado à idade também considera um fator de nível baixo. O modelo apresentado nesse tópico representa as mudanças ocorridas no desempenho devido aos efeitos da idade.

Segundo Klein *et al.* (2000) e Snel e Cremer (1995), muitas evidências sugerem que o desempenho diminui com o aumento da idade. Ambas as faculdades cognitivas e físicas mostram uma diminuição no desempenho de aproximadamente 1% por ano de idade, após a idade de vinte anos (SALTHOUSE, 2000). Até a idade de 20 anos, o corpo humano ainda está em desenvolvimento, e aumenta o desempenho até o ponto máximo, o que varia entre indivíduos.

As funções cognitivas básicas do corpo humano tal como memória de curto prazo, velocidade de processamento e tomadas de decisão tão bem quanto às faculdades físicas como o exercício aeróbico, a oxigenação, e a força máxima do músculo diminuem linearmente quando consideradas isoladamente (MUNOZ *et al.* (1998); SHEPARD (2000)). Esses efeitos são mediados e podem ser significativamente reduzidos pelo aumento de técnicas e habilidades interpessoais, experiência, treinamentos físicos e estilos de vida pessoal (GAUDART, (2000) e SCHIBYE *et al.*, (2001)).

De acordo com Warr (1995), estes efeitos mascaram a diminuição do desempenho devido à idade. O modelo desenvolvido por esse autor assume que não são mensuráveis as reduções devido à idade até a idade de trinta anos e que esses efeitos ocorrem linearmente até sessenta e cinco anos quando o maior impacto da idade é sentido. Neste modelo, assumiu-se que a taxa de redução do desempenho (d) devido à idade não é uma constante de 1% por ano de idade, mas aumenta linearmente de 0% (antes dos trinta anos) até 1% na idade de sessenta e cinco anos. Consequentemente, para a faixa de idade de 30-65, “ d ” é dado por:

$$d = \frac{(a - 30)}{35} \quad (2)$$

Onde: d = taxa de decremento do desempenho devido à idade ao ano; a = idade em anos.

A redução do desempenho em uma idade “ a ” é dada por:

$$D = d (a - 30) \quad (3)$$

A Equação 1 fornece uma redução percentual no desempenho que pode ser aplicada diretamente ao modelo teste de simulação a eventos discretos para aumentar o tempo de ciclo em cada estação de trabalho. Os efeitos desse modelo são mostrados na Figura 3.10.

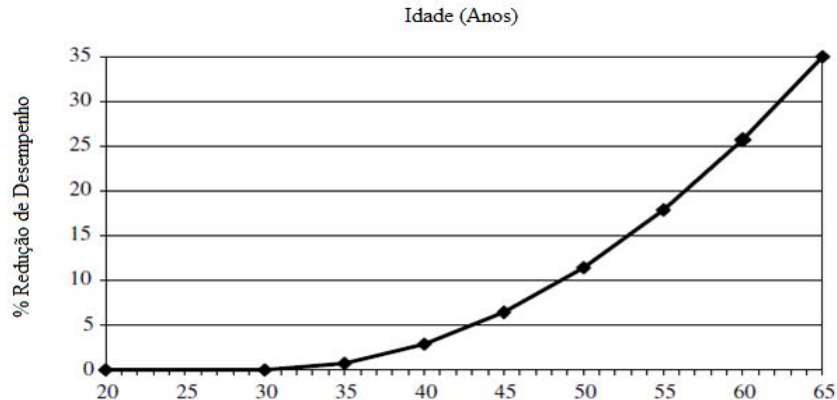


Figura 3.10 - Modelo de desempenho humano relacionado à idade

Fonte: Adaptado de Baines *et al.* (2004).

3.4.5.3 Teoria do desempenho humano relacionado à aprendizagem e fadiga

Segundo Digiesi *et al.* (2009), para desenvolver um modelo de simulação que considere a influência de fatores humanos no desempenho do operador, dois problemas devem ser solucionados. Em primeiro lugar, o comportamento do operador deve ser quantificado em processos industriais para garantir que eles são válidos. Em segundo lugar, uma vez que um modelo válido é obtido, ele deve ser incluído nas ferramentas de simulação disponíveis. No entanto, quantificar o comportamento do operador em um contexto industrial é um processo que consome tempo e dados. A caracterização do comportamento do operador requer a coleta de uma grande quantidade de dados.

Wright (1936) foi o primeiro a desenvolver modelos teóricos e empíricos relacionados à variabilidade do comportamento do operador ao longo do tempo. Assim, o trabalho de Wright (1936) investigou a influência do fenômeno da aprendizagem sobre o comportamento dos operadores envolvidos em tarefas manuais e repetitivas. O modelo desenvolvido por Wright (1936) relacionou a duração prevista da tarefa para a repetição “n-th”, “Y(n)”, com o número “n” de tarefas concluídas, o desempenho esperado na primeira repetição “y(1)”, e o fator de aprendizagem “b”, como mostra a Equação 4.

$$Y(n) = y(1).n^{-b} \quad (4)$$

Segundo Digiesi *et al.* (2009), a partir da obra de Wright, muitos modelos foram propostos na literatura. Todos os modelos relacionam o tempo de conclusão da tarefa com o número de tarefas previamente completadas, e diferem de acordo com o fator humano que é considerado (por exemplo, a aprendizagem, fadiga, esquecimento).

Mummolo *et al.* (2004) propôs um modelo que considera o efeito conjunto da aprendizagem e da fadiga. O modelo é apresentado na Equação 5. Sendo “n” o número de repetições, a duração da tarefa prevista na “n-th” repetição é dada por:

$$y(n) = y(1) + \left[(M - y(1)) \cdot (1 - n^{-\tau}) \right] - \left[(y(1) - m) \cdot (1 - n^{-\lambda}) \right] \quad (5)$$

Onde:

y (1): é a duração prevista da tarefa (desempenho) para a primeira repetição;

M: é o limite de pior desempenho esperado devido à fadiga depois de um grande número de repetições;

m: é uma estimativa do desempenho incompreensível do operador;

λ : é o fator de aprendizagem ($0 < \lambda < 1$);

τ : é o fator de fadiga ($0 < \tau < 1$).

Na Equação 5 o termo y(1) é uma medida estática do desempenho do operador, uma vez que o desempenho inicial do operador está relacionado com sua habilidade e experiência. Assim, y(1) não é influenciada pelo fenômeno que ocorre durante o período de tempo de trabalho. Os termos $+ \left[(M - y(1)) \cdot (1 - n^{-\tau}) \right]$ e $- \left[(y(1) - m) \cdot (1 - n^{-\lambda}) \right]$ separadamente modelam os efeitos da fadiga e da aprendizagem, uma vez que eles respectivamente tendem a aumentar e a diminuir o tempo de conclusão das tarefas durante o turno de trabalho.

3.5 Considerações Finais

Com base no levantamento teórico apresentado neste capítulo, observou-se que devido à complexidade dos sistemas reais, a simulação computacional consegue capturar as características dinâmicas e aleatórias desses sistemas. Porém, observa-se que existe uma folga

entre o desempenho previsto pelos modelos de simulação e as saídas que tais sistemas geram no sistema real.

Com o intuito de diminuir esse erro de previsão, e tornar os modelos mais próximos do desempenho do sistema real, inicialmente foi identificada nesse capítulo uma série de fatores que podem influenciar o comportamento do operador ao longo do turno de trabalho. Embora atualmente exista uma variedade de teorias relacionadas aos fatores que podem influenciar o desempenho humano, existe uma lacuna no que se refere à modelagem e simulação do desempenho humano.

Nesse capítulo foram identificados alguns modelos de desempenho humano existentes, como por exemplo, modelos referentes à variação do desempenho em relação à idade, ritmo circadiano, aprendizagem e fadiga simultaneamente, porém, alguns desses foram desenvolvidos a partir de contextos divergentes do objeto de estudo desta pesquisa, tais como uma Universidade, por exemplo, com alunos e não com operadores trabalhando ao longo de um turno de trabalho em uma linha de montagem, por exemplo, como ocorre no objeto de estudo desta pesquisa.

Diante disso, optou-se por explorar nessa pesquisa a influência de dois fatores humanos, o ritmo circadiano e o trabalho em turnos no desempenho dos operadores em uma linha de montagem manual. A intenção da pesquisa foi verificar como esses fatores poderiam ser incluídos em um modelo de simulação e a partir daí analisar se a consideração desses fatores altera os resultados previstos sem a incorporação desses.

4. APLICAÇÃO DO MÉTODO

4.1 Considerações iniciais

A presente pesquisa foi desenvolvida no período de março de 2009 a agosto de 2010, com dados coletados de setembro de 2009 a abril de 2010. Para o desenvolvimento do estudo de simulação, utilizou-se a metodologia proposta por Montevechi *et al.* (2010), composta de três fases: concepção, implementação e análise.

A seguir será descrito como os passos desta metodologia foram conduzidos durante esta pesquisa.

4.2 Concepção

Passo 1.1: Objetivo e definição do sistema

Conforme apresentado no primeiro capítulo, o objetivo desta pesquisa é responder as seguintes questões de pesquisa:

- Como inserir fatores humanos em um modelo de simulação a eventos discretos?
- A incorporação de fatores humanos, especificamente o ritmo circadiano e o trabalho em turnos, em um modelo de simulação a eventos discretos alteram os resultados previstos pelo modelo de simulação sem a incorporação desses fatores?

A presente pesquisa foi aplicada em uma linha de produção de componentes de sistema elétrico de injeção eletrônica de veículos (conhecidos como chicotes), que apresenta elevada proporção de trabalho manual, composta por doze operadores. Nesta linha são produzidos três tipos de componentes de sistemas elétricos de injeção eletrônica. Porém, neste trabalho optou-se por analisar a produção apenas do primeiro produto, que corresponde a 91,6% do mix de produção.

Para este produto, a linha em estudo possui um *output* esperado de 189 peças/turno ou 23 peças/hora. A concepção da linha é *Just in Time* que tem como característica a produção de

peças atendendo o sequenciamento de produção do cliente. Nesta pesquisa, a variável de saída escolhida foi o total produzido.

Passo 1.2: Construção do modelo conceitual














A técnica de modelagem conceitual abordada nesta pesquisa foi a técnica IDEF-SIM, metodologia focada em projetos de simulação, elaborada a partir de três técnicas de modelagem: IDEF-0, IDEF-3 e Fluxograma. Segundo Leal (2008), o uso desses símbolos foi adaptado às necessidades encontradas em projetos de simulação. A Tabela 4.1 apresenta os elementos, a simbologia utilizada e a técnica de origem.

Justifica-se a escolha desta técnica porque ela apresenta a vantagem de permitir a representação gráfica dos recursos humanos (operadores) inseridos no fluxo do processo ou na rede de transição de estados e objetos, fator extremamente importante nesta pesquisa (MONTEVECHI *et al.* 2010).

Desta forma, antes da elaboração do modelo computacional já é possível analisar quais recursos (operadores) serão analisados no modelo, através da modelagem conceitual realizada pelo IDEF-SIM. Outra contribuição desta técnica é a possibilidade de um especialista em simulação e modelagem computacional conseguir construir um modelo computacional a partir de um modelo conceitual elaborado através da técnica IDEF-SIM, mesmo sem ter acesso ao sistema real.

Segundo Leal (2008), a técnica IDEF-SIM reduz o tempo gasto na modelagem computacional, uma vez que regras envolvendo a movimentação, o uso de recursos e controles, além das transformações de entidades, possibilitam ao modelador construir um modelo conceitual mais próximo das exigências de um modelo computacional. Essa técnica poderá ser utilizada também na fase de documentação do modelo, para registrar a lógica do modelo, facilitando o trabalho de verificação e validação, além de permitir um maior entendimento por parte dos leitores do trabalho.

Tabela 4.1 - Simbologia utilizada na técnica IDEF-SIM

Elementos	Simbologia	Técnica de origem
Entidade		IDEF3 (modo descrição das transições)
Funções		IDEF0
Fluxo da entidade		IDEF0 e IDEF3
Recursos		IDEF0
Controles		IDEF0
Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos	 &	Regra E
	 X	Regra OU
	 O	Regra E/OU
Movimentação		Fluxograma
Informação explicativa		IDEF0 e IDEF3
Fluxo de entrada no sistema modelado		
Ponto final do sistema		
Conexão com outra figura		

Fonte: Leal (2008).

A seguir detalha-se a função de cada elemento apresentado na Tabela 4.1:

1. Entidade: São os itens a serem processados pelo sistema, representando matéria-prima, produtos, pessoas, documentos, entre outros. Elas podem ser agrupadas ou divididas ao longo do processo produtivo e são movimentadas por meios próprios ou por meio de recursos. Uma vez representada, o símbolo somente aparecerá no momento em que uma nova entidade for criada. Desta forma, torna-se claro o número de entidades a ser utilizada e em que pontos do modelo a entidade sofrerá uma transformação.
2. Funções: Representam os locais onde a entidade sofrerá alguma ação. Entendem-se como funções os postos de trabalho, esteiras de movimentação, filas e estoques e postos de atendimento. Estas funções podem modificar uma entidade, como no caso de postos de trabalho, ou mesmo alterar o ritmo de tempo desta entidade no fluxo, como uma espera, por exemplo, em uma fila ou estoque.
3. Fluxo da entidade: Representa o direcionamento da entidade dentro do modelo,

caracterizando os momentos de entrada e saída da entidade nas funções.

4. Recursos: Representam elementos utilizados para movimentar as entidades e executar as funções. Os recursos podem representar pessoas ou equipamentos. Em um sistema pode haver recursos estáticos ou dinâmicos. Os recursos estáticos não são dotados de movimento. Os recursos dinâmicos, por sua vez, podem se mover sobre um caminho definido.
5. Controles: Representam regras utilizadas nas funções, como sequenciamento, regras de filas, programações, entre outros.
6. Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos: Estas regras são chamadas de junções, na técnica IDEF3. Dois ou mais caminhos, após uma função, podem ser executados juntos (junção E), ou de forma alternativa (junção OU), ou permitindo ambas as regras (junção E/OU).
7. Movimentação: Representa um deslocamento de entidade, no qual o modelador acredita possuir efeito importante sobre o modelo. Ao representar este elemento, esperam-se encontrar no modelo computacional uma programação específica para este movimento, como tempo gasto e recurso utilizado.
8. Informação explicativa: Utilizada para inserir uma explicação no modelo, com o objetivo de facilitar o entendimento do modelo.
9. Fluxo de entrada no sistema modelado: Define a entrada ou criação das entidades dentro do modelo.
10. Ponto final do sistema: Define o final de um caminho dentro do fluxo modelado. Tudo o que, na prática, encontra-se além deste ponto está fora dos limites do modelo.
11. Conexão com outra figura: Utilizado para dividir o modelo em figuras diferentes.

Nesta pesquisa, foram elaborados dois modelos conceituais para a linha de produção estudada, através da técnica de modelagem IDEF-SIM.

Na elaboração do primeiro modelo conceitual, inicialmente utilizou-se a Folha de trabalho padronizado mostrada na Figura 4.1 que representa o *layout* da linha em estudo, com o objetivo de avaliar a sequência dos operadores e dos postos de trabalho, a distância entre as

mesas, dentre outras informações importantes.

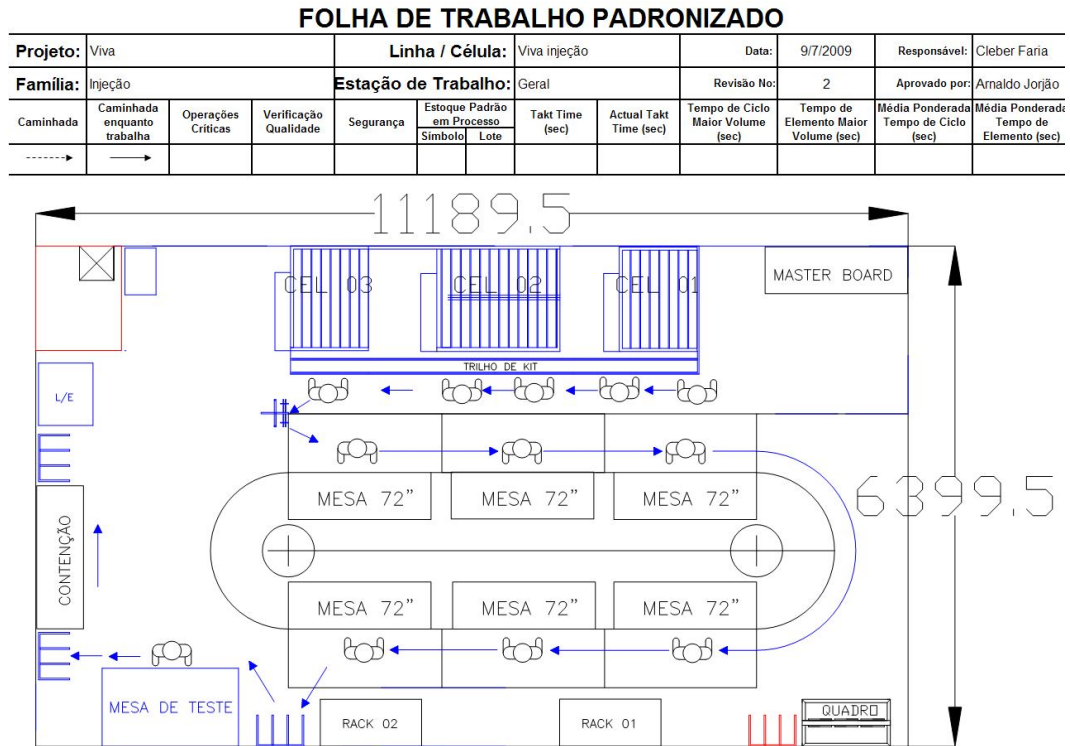


Figura 4.1 - Folha de trabalho padronizado do processo em estudo

A partir de então, elaborou-se o primeiro modelo conceitual da linha de produção em estudo com o auxílio da técnica de modelagem IDEF-SIM, como mostrado na Figura 4.2.

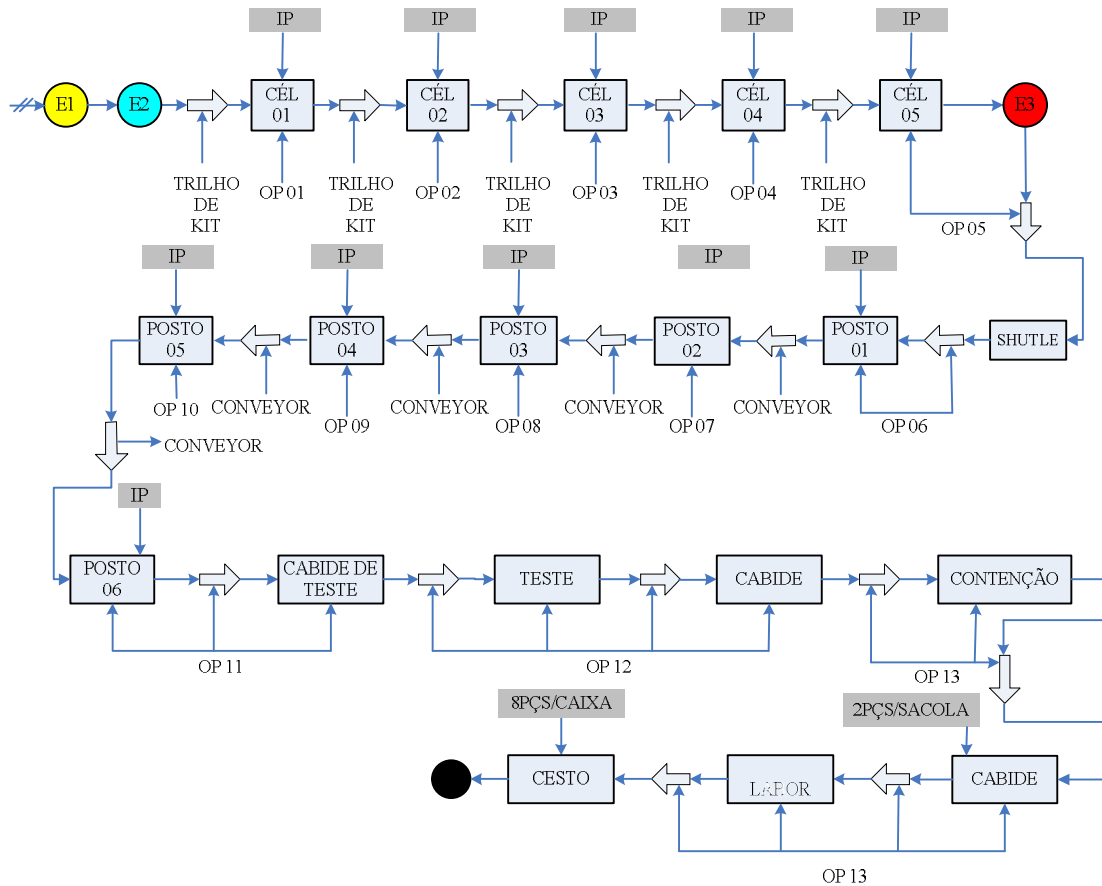


Figura 4.2 - Modelo conceitual do processo em estudo (IDEF-SIM Fluxo Contínuo).

Após a elaboração do modelo conceitual do processo em estudo através da técnica de modelagem IDEF-SIM Fluxo Contínuo, o mesmo foi apresentado a pessoas treinadas em algum *software* de simulação, com o objetivo de se verificar até que ponto o modelo conceitual em IDEF-SIM poderia orientar o praticante de simulação na confecção do modelo computacional. A partir desta análise, foi possível estabelecer um relacionamento entre os elementos gráficos do IDEF-SIM e os elementos utilizados em *softwares* na construção do modelo computacional. Para exemplificar a relação, foi escolhido o *software* Promodel®.

De posse das observações feitas pelo especialista do processo, a pesquisadora optou por desenvolver uma adaptação da técnica IDEF-SIM, utilizando o *layout* da célula para o desenvolvimento do modelo conceitual, tornando-o assim mais próxima da realidade das atividades do processo. Dessa forma, o modelo conceitual IDEF-SIM Fluxo Contínuo, apresentado na Figura 4.2, foi transformado no modelo conceitual Mapa IDEF-SIM,

conforme mostrado na Figura 4.3.

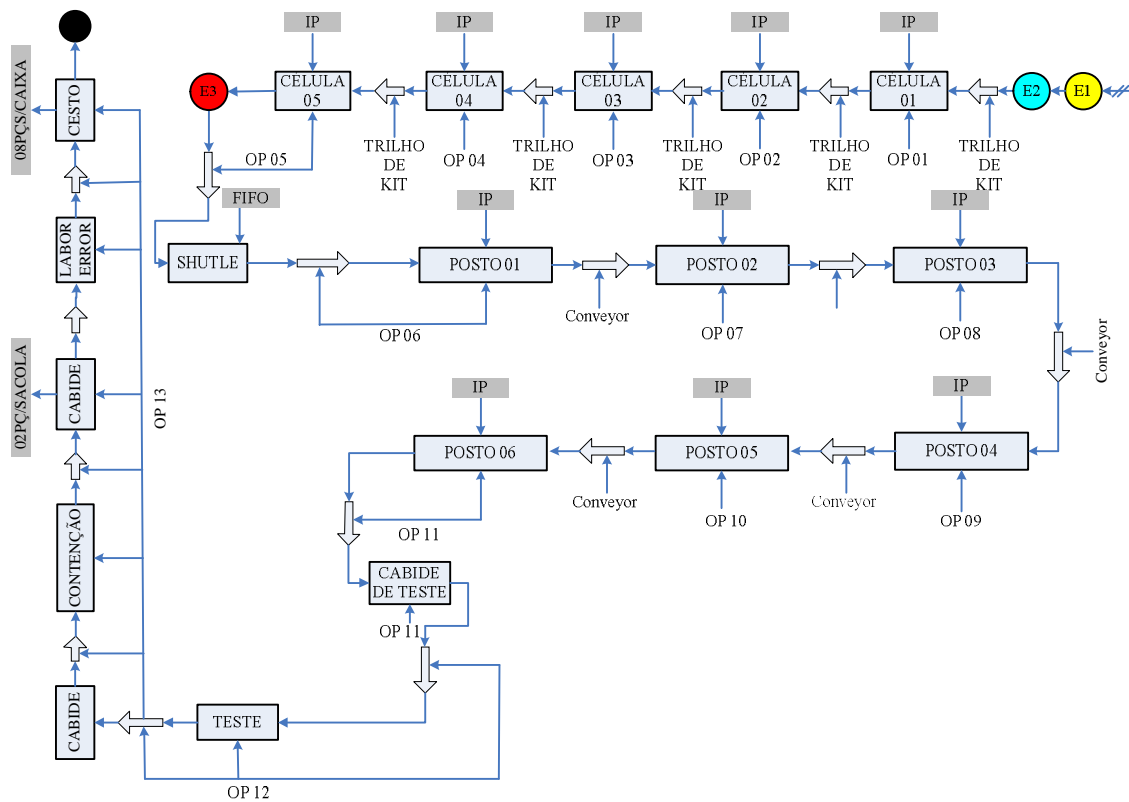


Figura 4.3 - Modelo conceitual do processo em estudo (Mapa IDEF-SIM).

O modelo conceitual obtido através da técnica de modelagem Mapa IDEF-SIM apresentado na Figura 4.3 oferece informações sobre o *layout* da linha de montagem, como o posicionamento no espaço dos postos de trabalho, distância dos operadores em relação aos demais postos de trabalho, transporte de equipamentos e dos operadores, além das vantagens já mencionadas na pesquisa sobre a técnica IDEF-SIM.

Para ambos os modelos conceituais apresentados acima, em cada uma das etapas do processo, além da indicação das funções, têm-se também a indicação dos operadores responsáveis pelas funções (recursos). Neste modelo, foram identificados 12 (doze) operadores e 04 (quatro) entidades: E1 (Manifesto), E2 (Kit de Montagem), E3 (Chicote) e E4 (Entidade Auxiliar). A seguir estão apresentadas as definições das entidades:

- E1 (Manifesto): O manifesto é um documento, que pode ser considerado a entidade que dá início ao processo de fabricação, porém sua representação gráfica no modelo

computacional não é necessária. No modelo conceitual esta entidade é representada apenas para indicar o início do processo de fabricação.

- E2 (Kit de Montagem): Refere-se a um conjunto de conectores com circuitos ligados que durante o processo recebe a inclusão de outros circuitos ligados, tornando-se mais completo a cada célula.
- E3 (Chicote): Refere-se ao conjunto de conectores mais completo, logo após a saída da Célula 05.
- E4 (Auxiliar): Não possui aspecto gráfico.

Foram identificados neste processo 04 (quatro) controles, ou seja, regras utilizadas nas funções: Instrução de Processo (IP), FIFO (*First in First Out*), 02 Peças (PÇS) / Sacola e 08 Peças (PÇS) / Caixa, conforme descrito abaixo:

- Instrução de Processo (IP): Esse tipo de regra é necessário na prática, justificando a sua inclusão no modelo conceitual devido à necessidade do operador conhecê-la para determinar a sequência de suas atividades. Já no modelo computacional não é necessária a simulação da mesma, uma vez que se supõe que o operador já conhece suas instruções de trabalho.
- *First in First Out* (FIFO): Este tipo de controle indica que o primeiro a entrar no *Shuttle* é o primeiro a sair para o posto 01.
- 02 Peças/Sacola: Este controle indica que no cabide, cada sacola agrupa um total de 02 peças.
- 08 Peças/Caixa: Este controle indica que no cesto são embaladas 08 peças por caixa.

Passo 1.3: Validação do modelo conceitual

A validação do modelo conceitual consiste em aceitar ou não o modelo como uma boa representação do sistema real.

As técnicas de validação preliminares utilizadas para essas avaliações são a validação face-a-face (presencial) e o rastreamento.

Na validação face-a-face (presencial) os especialistas sobre o sistema irão avaliar o modelo conceitual para determinar se ele está correto e razoável para a sua finalidade. Isso geralmente requer análise do fluxograma ou do modelo gráfico, ou do conjunto de equações do modelo (SARGENT, 2009).

O uso de rastreamento é o acompanhamento das entidades através de cada sub-modelo e do modelo geral para determinar se a lógica está correta e se a precisão necessária é mantida. Se forem encontrados erros no modelo conceitual, estes devem ser revistos e a validação conceitual começa novamente (SARGENT, 2009).

Uma vez que os especialistas do processo estavam presentes desde o início da atividade de desenvolvimento do modelo conceitual, tal tarefa não apresentou grandes dificuldades. No presente estudo, a validação face-a-face (presencial) foi realizada em duas etapas:

- 1ª Validação face-a-face (presencial): Essa validação foi realizada por um especialista da técnica de modelagem IDEF-SIM que não conhece a linha de montagem.
- 2ª Validação face-a-face (presencial): Essa validação foi realizada por um especialista do sistema que conhece o processo de montagem e que desconhece a técnica de modelagem IDEF-SIM.

Na presente pesquisa, o rastreamento foi realizado através da verificação dos sub-modelos e do modelo geral para avaliar se a lógica estava correta.

Passo 1.4: Documentação do modelo conceitual

Após a validação do modelo conceitual, este foi documentado através da técnica de modelagem IDEF-SIM.

Passo 1.5: Modelagem dos dados de entrada

Para o desenvolvimento da modelagem dos dados de entrada, inicialmente foram levantados todos os dados necessários para a confecção do modelo conceitual e computacional, além de alguns dados necessários para compreender a lógica de funcionamento do sistema total.

Na primeira etapa da coleta de dados, foi realizada uma coleta de informações *in loco*, através de observações e entrevistas com os doze operadores. A condução da entrevista seguiu o seguinte roteiro:

- definição das entidades do sistema;
- definição das funções do sistema;
- definição do fluxo das entidades;
- identificação dos recursos;
- identificação dos controles de cada função;
- identificação das regras para fluxos paralelos e/ou alternativos;
- identificação da movimentação;
- identificação da informação explicativa;
- identificação do fluxo de entrada no sistema modelado;
- identificação do ponto final do sistema;
- identificação de conexão com outra figura.

Este roteiro permitiu ao pesquisador conduzir as entrevistas e observações, evitando perder o foco do objetivo principal. De posse de prancheta, papel e caneta, foi possível a construção do fluxo de setas durante a observação e as entrevistas, auxiliando a confecção do modelo conceitual e computacional.

Na segunda etapa, foram levantados os tempos de processamento do produto, o

volume contratado e o *mix* de produção, considerados pela empresa inicialmente, sem a consideração da influência de fatores humanos, através do Controle 17, que é uma planilha em Excel utilizada pela empresa que auxilia no cálculo da quantidade de mão-de-obra necessária para um determinado projeto, conforme apresentado nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6. Nesta planilha estão todas as informações essenciais do projeto, tais como, o nome do projeto e da linha, a descrição dos produtos a serem produzidos por esta linha, o código do dispositivo utilizado (mesa de montagem) e o número do cliente de cada produto. Nesta planilha são apresentadas as seguintes informações:

- Volume: Demanda diária do produto.
- Mix de Produção: Percentual de participação de cada produto no volume total.
- Tempo de Montagem: Tempo total necessário para a montagem de cada produto especificado pelo departamento de cotação.
- Quantidade de Linhas: Número de linhas a produzir o produto.
- Horas/Turno: Tempo total disponível por turno já desconsiderando as paradas programadas.
- Quantidade de Turnos: Quantidade de turnos existentes por dia.

Ao entrar com as informações acima as saídas são:

- *Forecast* diário: Quantidade de cada tipo de peça requisitada diariamente calculada através do *mix* de produção.
- Operadores por linha: Quantidade de operadores necessária para cada linha em cada turno.
- Tempo de Ciclo: Tempo de ciclo de cada um dos itens.
- Capacidade por linha/turno: Capacidade de produção de cada linha em cada turno.
- Capacidade total: Capacidade total diária do projeto.
- Capacidade de produção: Percentual da capacidade total diária do projeto em relação ao volume requisitado diariamente.

- Peças por hora: Capacidade de produção por hora de cada linha.

Na terceira etapa, foram utilizados os tempos de processamento coletados pelo Laboratório de Estudos de Tempos & Métodos (Engenharia), considerados nessa pesquisa como os tempos de processamento da Engenharia. Tempos estes utilizados pela empresa para cálculo da produção diária da linha de montagem. Este laboratório é responsável por realizar todo o desenvolvimento de processo, estudo de tempos e desenvolvimento de métodos produtivos. A definição do método produtivo se dá em três fases.

Em todas as três fases, o técnico de processo responsável pelo desenvolvimento, define inicialmente uma sequência de montagem (método operatório) e depois realiza a cronoanálise desta sequência (estudo de tempos).

Na primeira fase do Estudo de Tempos & Métodos, é definida uma sequência de montagem inicial de todo o conteúdo de trabalho do produto. Nesta fase é considerada somente a melhor sequência das atividades sem se importar com o tempo de execução de cada uma destas atividades. Após a definição desta sequência, inicia-se o estudo de tempos. Para esta atividade é necessário a presença de um operador treinado (de preferência que já trabalhe em alguma linha de produção similar). O operador executa toda a sequência de montagem determinada, elemento por elemento, e o técnico vai tomando os tempos de processamento de cada elemento de trabalho. O número mínimo de tomadas de tempos de processamento necessário é de dez tomadas de tempos de processamento. Após a coleta destes dados, o técnico inicia a definição do primeiro balanceamento (divisão de postos de trabalhos) desta sequência de trabalho. Para esta atividade é necessário que o técnico conheça qual o *Takt Time* da linha para que ele possa carregar cada estação de trabalho com o tempo de trabalho de no máximo igual ao *Takt Time*. Após a divisão de trabalho, realiza-se a comparação do tempo total de montagem do produto com o tempo cotado (definido pelo departamento de cotação através de um catálogo de tempos) para fazer a comparação se o tempo real de montagem está menor ou maior que o tempo cotado (cobrado do cliente).

As duas próximas fases de Estudo de Tempos & Métodos procedem-se da mesma forma da descrita anteriormente, diferenciando somente no fato de que nestas duas próximas atividades, a sequência de montagem pré-definida na primeira fase, não sofre grandes alterações, somente pequenas alterações de sequência da montagem de alguns elementos de trabalho para facilitar a montagem do produto ou a divisão do conteúdo de trabalho entre os

postos de trabalho da linha. Estas atividades de Estudo de Tempos & Métodos são realizadas, normalmente, durante o período das 06h00min às 17h18min, uma vez que o Laboratório de Estudos de Tempos & Métodos funciona apenas durante esse intervalo.

A Tabela 4.2 apresenta a distribuição e seus respectivos parâmetros (média e desvio padrão) referentes aos tempos de processamento coletados pelo Laboratório de Estudos de Tempos & Métodos (Tempos da Engenharia) sob condições ideais.

Tabela 4.2 - Tempos de processamento coletados pelo Laboratório de Estudos de Tempos & Métodos

POSTOS DE TRABALHO	ENT_KIT (tempos em seg)	ENT_AUX (tempos em seg)	ENT_CHICOTE (tempos em seg)
LOC_CEL1	N(139,3)		
LOC_CEL2	N(149,3)		
LOC_CEL3	N(153,4)		
LOC_CEL4	N(147,3)		
LOC_CEL5	N(153,2)		
LOC_POSTO1		N(149,1)	
LOC_POSTO2		N(150,5)	
LOC_POSTO3		N(152,4)	
LOC_POSTO4		N(149,2)	
LOC_POSTO5		N(147,5)	
LOC_POSTO6		N(145,2)	
LOC_TESTE			N(140,8)
LOC_CONTENÇÃO			N(130,5)
LOC_LABEL_ERROR			N(10,2)

Capítulo 04 – Aplicação do Método

Total Min	Refeicao	Reuniao	Ginastica	Café / banheiro	Set-up	DATA : 12/10/2008	
1149	120	20	10	16	0	QTD. TURNO: 2	
PROJETO: Viva		LINHA: Injeção		HRS/TURNO: 8,19		MIN./TURNO 491,5	

DESCR. CHICOTE	P/N	Nº CLIENTE	% NA FAMILIA	FORECAST DIARIO (Atual)	MIX (%) PROD.	MESAS POR LINHA	QTD. DE LINHAS	OPERADORES POR LINHA	TEMPO DE MONTAGE M (min.)	TEMPO CICLO (min.)	TEMPO CICLO (seg.)	CAPAC. POR LINHA / TURNO	CAPAC. TOTAL	CAPAC. PRODUÇÃO	Peças por Hora	MIX (%) PROD.	TEMPO MEDIO DE MONTAGE M
Injeção Viva	13704083	93702509		326,0	91,6%	6	1	6	15,61	2,60	156,11	189	378	106%	23	91,6%	14,30
Injeção Viva	13704084	93702510		30,0	8,4%	6	1	6	15,18	2,53	151,81	194	389	109%	24	8,4%	1,28
Injeção Viva	13704085	94730003		0,0	0,0%	6	1	6	15,18	2,53	151,81	194	389	109%	24	0,0%	0,00
RESUMO				356	100%	6	1	6	15,57	2,60	156	189	379	106%	23	100,0%	15,57

Figura 4.4 - Controle 17 da Montagem

Total Min	Refeicao	Reuniao	Ginastica	Café / banheiro	Set-up	DATA : 12/10/2008	
1149	120	20	10	16	0	QTD. TURNO: 2	
PROJETO: Viva		LINHA: Injeção		HRS/TURNO: 8,19		MIN./TURNO 491,5	

DESCR. CHICOTE	P/N	Nº CLIENTE	% NA FAMILIA	FORECAST DIARIO (Atual)	MIX (%) PROD.	MESAS POR LINHA	QTD. DE LINHAS	OPERADORES POR LINHA	TEMPO DE MONTAGE M (min.)	TEMPO CICLO (min.)	TEMPO CICLO (seg.)	CAPAC. POR LINHA / TURNO	CAPAC. TOTAL	CAPAC. PRODUÇÃO	Peças por Hora	MIX (%) PROD.	TEMPO MEDIO DE MONTAGE M
Injeção Viva	13704083	93702509		326,0	91,6%	1	1	5	12,97	2,59	155,67	189	379	106%	23	91,6%	11,88
Injeção Viva	13704084	93702510		30,0	8,4%	1	1	5	12,72	2,54	152,59	193	387	109%	24	8,4%	1,07
Injeção Viva	13704085	94730003		0,0	0,0%	1	1	5	12,72	2,54	152,59	193	387	109%	24	0,0%	0,00
RESUMO				356	100%	1	1	5	12,95	2,59	155	190	380	107%	23	100,0%	12,95

Figura 4.5 - Controle 17 do KIT

Capítulo 04 – Aplicação do Método

Total Min	Refeicao	Reuniao	Ginastica	Café / banheiro	Set-up	DATA : 12/10/2008		
1149	120	20	10	16	0	HRS/TURNO: 8,19	MIN./TURNO 491,5	QTD. TURNO: 2

DESCR. CHICOTE	P/N	Nº CLIENTE	% NA FAMILIA	FORECAST DIARIO (Atual)	MIX (%) PROD.	MESAS POR LINHA	QTD. DE LINHAS	OPERADORES POR LINHA	TEMPO DE MONTAGE M (min.)	TEMPO CICLO (min.)	TEMPO CICLO (seg.)	CAPAC. POR LINHA / TURNO	CAPAC. TOTAL	CAPAC. PRODUÇÃO	Pegas por Hora	MIX (%) PROD.	TEMPO MEDIO DE MONTAGE M
Injeção Viva	13704083	93702509		326,0	91,6%	1	1	2	3,97	1,99	119,20	247	495	139%	30	91,6%	3,64
Injeção Viva	13704084	93702510		30,0	8,4%	1	1	2	3,97	1,99	119,20	247	495	139%	30	8,4%	0,33
Injeção Viva	13704085	94730003		0,0	0,0%	1	1	2	3,97	1,99	119,20	247	495	139%	30	0,0%	0,00
RESUMO				356	100%	1	1	2,0	3,97	1,99	119	247	495	139%	30	100,0%	3,97

Figura 4.6 - Controle 17 do Teste e Embalagem

E finalmente, na quarta etapa da coleta de dados, realizou-se a cronoanálise nos doze postos de trabalho, onde cada um dos cronometristas já havia sido orientado de que os dados deveriam ser coletados em quatro períodos estipulados, conforme apresentado na Tabela 4.3, durante um dia normal de funcionamento da linha, no primeiro e segundo turnos.

Tabela 4.3 – Horário de coleta dos dados

Turno	Período			
	Primeiro (Início do turno)	Segundo (Antes do almoço/ jantar)	Terceiro (Depois do almoço/jantar)	Quarto (Término do turno)
Primeiro	06:00 às 07:00	09:45 às 10:45	12:45 às 13:45	14:45 às 15:45
Segundo	16:40 às 18:00	19:00 às 20:00	21:00 às 22:00	00:00 às 01:40

A partir da realização da cronoanálise, os tempos de processamento foram inseridos no modelo de simulação, através da distribuição encontrada para cada conjunto de dados de cada período.

Para o desenvolvimento do modelo de simulação foi utilizado o *software* Promodel®. As razões da escolha deste *software* nesta pesquisa devem, sobretudo, ao uso da animação gráfica, uma importante aliada na verificação e validação do modelo. Além disso, optou-se pela utilização desse *software* por ele estar disponível na Universidade, além da possibilidade de emissão de relatórios estatísticos e da comunicação com o *Excel*®. Este pacote incorpora três programas principais: Promodel® (para simulação de elementos discretos), SimRunner® (para otimização de modelos de otimização) e Stat::Fit® (para estudo de distribuições de probabilidade).

O *software* Promodel® permite ao usuário inserir os tempos de processamento de cada posto de trabalho tanto na tela de *Processing*, como apresentado na Figura 4.7, ou utilizando um recurso de leitura de arquivos externos, como apresentado na Figura 4.8. Para a inclusão dos tempos de processamento no modelo em estudo, foi utilizado o recurso de leitura de um arquivo externo em planilha *Excel*®.

O editor de arquivos externos consiste em uma tabela com campos específicos de arquivos externos que serão utilizados durante a simulação, como mostra a Figura 4.8.

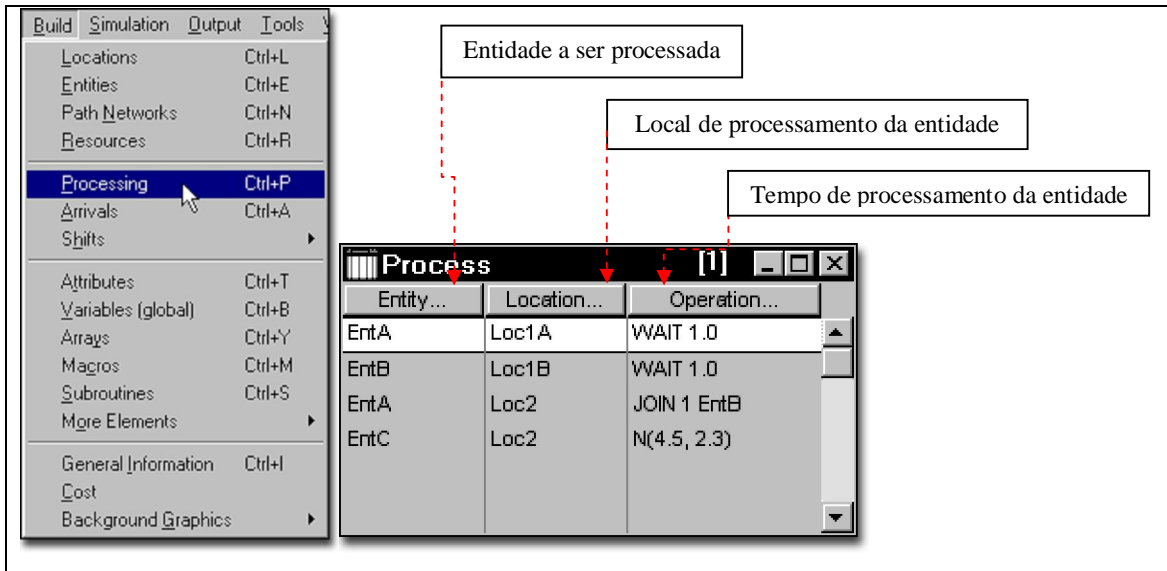


Figura 4.7 - Tela de *Processing*

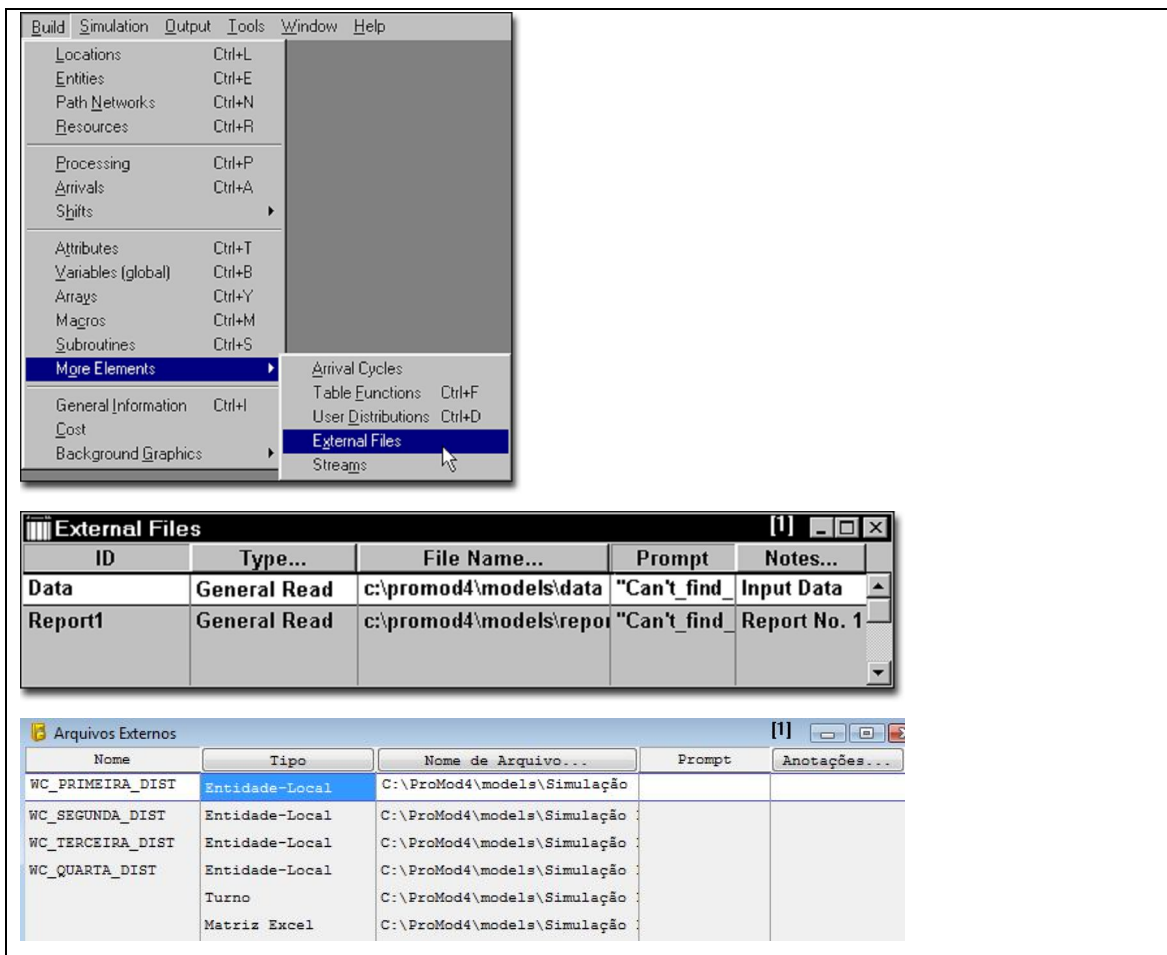
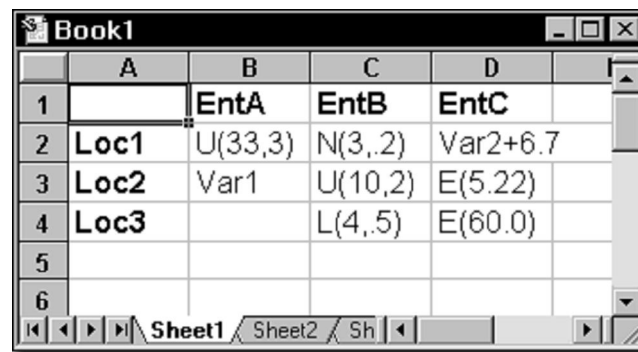


Figura 4.8 - Tela de Arquivos Externos

Cada um dos campos apresentados na Figura 4.8 é definido da seguinte forma:

- **ID (Nome):** Especifica o nome criado pelo usuário para identificar o arquivo externo.
- **Type (Tipo):** Especifica o tipo de arquivo externo a ser utilizado em uma lista pré-determinada. Os arquivos externos podem ser: *General Read*, *General Write*, *Entity Location*, *Arrival*, *Shift*, *DLL* e *Array*.
- **File Name (Nome do Arquivo):** Especifica o nome do arquivo incluindo o caminho (*Path*).
- **Prompt (Mensagem):** Especifica uma mensagem a ser mostrada durante a execução do modelo caso o arquivo externo não possa ser aberto ou encontrado.
- **Notes (Anotações):** Aborda uma nota geral para descrever alguma informação sobre o arquivo.

No modelo em estudo, foi adotado o arquivo externo tipo *Entity Location*. Um arquivo *Entity Location* é um arquivo em Excel que contém expressões numéricas listadas por entidade e por nome de locais de processamento. O nome das entidades a serem processadas deve aparecer na primeira linha da planilha, começando na segunda coluna, enquanto o nome dos locais de processamento deve aparecer na primeira coluna iniciando na segunda linha. Uma expressão numérica contendo o tempo de processamento para entidade é inserido na célula onde há o cruzamento do local de processamento com a entidade a ser processada, conforme apresentado na Figura 4.9.



	A	B	C	D
1		EntA	EntB	EntC
2	Loc1	U(33,3)	N(3,2)	Var2+6.7
3	Loc2	Var1	U(10,2)	E(5.22)
4	Loc3		L(4,5)	E(60.0)
5				
6				

Figura 4.9: Tela de apresentação da *Entity Location*

De posse dos dados coletados em cada horário, utilizou-se o *software* Minitab a fim de determinar se os dados poderiam ser ajustados à Distribuição Normal. Com o Minitab foi

possível também identificar os parâmetros relevantes (média e desvio padrão) para os dados que se ajustaram à Distribuição Normal.

Para os dados não normais, utilizou-se o pacote Stat::Fit® do *software* Promodel®. Através do teste realizado aqui, foi possível determinar qual a distribuição de probabilidades fornecia a melhor representação dos dados de entrada, bem como a classificação das distribuições de acordo com o melhor ajuste, sua aceitação ou não como boa representação dos dados, assim como seus respectivos parâmetros. Nesta pesquisa, os dados foram ajustados às seguintes distribuições: Normal (N), Uniforme (U), Triangular (T), L (Lognormal).

Para inserir as distribuições encontradas, conforme descrito acima, foram elaboradas quatro planilhas em Excel contendo os tempos de processamento de cada um dos quatro períodos de cada turno de trabalho, conforme apresentado nas Tabelas 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, respectivamente para as distribuições dos primeiro, segundo, terceiro e quarto períodos analisados do primeiro turno e nas Tabelas 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 respectivamente para as distribuições dos primeiro, segundo, terceiro e quarto períodos do segundo turno.

Tabela 4.4 - Distribuição para os tempos de processamento coletados no Primeiro Período do Primeiro Turno

POSTOS DE TRABALHO	ENT_KIT (tempos em seg)	ENT_AUX (tempos em seg)	ENT_CHICOTE (tempos em seg)
LOC_CEL1	N(136.20,5.51)		
LOC_CEL2	U(141, 6.)		
LOC_CEL3	N(145.20,4.19)		
LOC_CEL4	N(138.80,4.17)		
LOC_CEL5	N(141.30,6.59)		
LOC_POSTO1		N(143.4,5.51)	
LOC_POSTO2		N(129.80,4.53)	
LOC_POSTO3		N(145,4.70)	
LOC_POSTO4		U(146, 7.5)	
LOC_POSTO5		N(148.90,5.07)	
LOC_POSTO6		N(140.8,5.76)	
LOC_TESTE			N(140.8,6.65)
LOC_CONTENÇÃO			N(130,5)
LOC_LABEL_ERROR			N(10,2)

Tabela 4.5 - Distribuição para os tempos de processamento coletados no Segundo Período do Primeiro Turno

POSTOS DE TRABALHO	ENT_KIT (tempos em seg)	ENT_AUX (tempos em seg)	ENT_CHICOTE (tempos em seg)
LOC_CEL1	N(140.8,8.54)		
LOC_CEL2	N(142.40,9.85)		
LOC_CEL3	N(145.80,8.95)		
LOC_CEL4	N(143.70,8.30)		
LOC_CEL5	N(134.80,7.58)		
LOC_POSTO1		N(148.10,7.39)	
LOC_POSTO2		N(127.30,4.19)	
LOC_POSTO3		N(144.10,6.45)	
LOC_POSTO4		U(148, 8.)	
LOC_POSTO5		N(150,5.10)	
LOC_POSTO6		N(150.90,5.76)	
LOC_TESTE			N(143.70,5.59)
LOC_CONTENÇÃO			N(130,5)
LOC_LABEL_ERROR			N(10,2)

Tabela 4.6 - Distribuição para os tempos de processamento coletados no Terceiro Período do Primeiro Turno

POSTOS DE TRABALHO	ENT_KIT (tempos em seg)	ENT_AUX (tempos em seg)	ENT_CHICOTE (tempos em seg)
LOC_CEL1	T(119, 156, 156)		
LOC_CEL2	N(141.50,8.58)		
LOC_CEL3	132+L(12.6, 7.35)		
LOC_CEL4	N(140.70,4.07)		
LOC_CEL5	N(142,7.28)		
LOC_POSTO1		N(146.80,8.75)	
LOC_POSTO2		N(129.90,4.64)	
LOC_POSTO3		N(139.90,5.17)	
LOC_POSTO4		N(150.60,4.52)	
LOC_POSTO5		N(149.60,7.63)	
LOC_POSTO6		N(143.50,5.90)	
LOC_TESTE			N(142.30,8.88)
LOC_CONTENÇÃO			N(130,5)
LOC_LABEL_ERROR			N(10,2)

Tabela 4.7 - Distribuição para os tempos de processamento coletados no Quarto Período do Primeiro Turno

POSTOS DE TRABALHO	ENT_KIT (tempos em seg)	ENT_AUX (tempos em seg)	ENT_CHICOTE (tempos em seg)
LOC_CEL1	N(136.10,9.84)		
LOC_CEL2	N(137.80,8.28)		
LOC_CEL3	N(143.80,5.84)		
LOC_CEL4	T(129, 149, 149)		
LOC_CEL5	N(139.40,7.46)		
LOC_POSTO1		N(147.20,6.05)	
LOC_POSTO2		N(129.40,2.92)	
LOC_POSTO3		N(141.90,5.58)	
LOC_POSTO4		N(149.30,4.37)	
LOC_POSTO5		N(147.70,4.69)	
LOC_POSTO6		-1.79e+003+ L(1.94e+003, 7.36)	
LOC_TESTE			N(150.30,9.22)
LOC_CONTENÇÃO			N(130,5)
LOC_LABEL_ERROR			N(10,2)

Tabela 4.8 - Distribuição para os tempos de processamento coletados no Primeiro Período do Segundo Turno

POSTOS DE TRABALHO	ENT_KIT (tempos em seg)	ENT_AUX (tempos em seg)	ENT_CHICOTE (tempos em seg)
LOC_CEL1	126+L(12.4, 9.34)		
LOC_CEL2	N(147.9,10.13)		
LOC_CEL3	N(132.1,8.93)		
LOC_CEL4	N(145,19.08)		
LOC_CEL5	N(136.3,10.14)		
LOC_POSTO1		N(128.1,9.98)	
LOC_POSTO2		N(132.3,7.31)	
LOC_POSTO3		N(130.3,4.08)	
LOC_POSTO4		N(133.4,8.07)	
LOC_POSTO5		N(141.6,7.53)	
LOC_POSTO6		N(138.5,16.77)	
LOC_TESTE			N(116.4,11.94)
LOC_CONTENÇÃO			N(130,5)
LOC_LABEL_ERROR			N(10,2)

Tabela 4.9 - Distribuição para os tempos de processamento coletados no Segundo Período do Segundo Turno

POSTOS DE TRABALHO	ENT_KIT (tempos em seg)	ENT_AUX (tempos em seg)	ENT_CHICOTE (tempos em seg)
LOC_CEL1	N(147,9.70)		
LOC_CEL2	N(148.3,15.12)		
LOC_CEL3	133+L(11.4, 13.4)		
LOC_CEL4	N(141.1,21.47)		
LOC_CEL5	N(140,8.95)		
LOC_POSTO1		N(138.8,10.09)	
LOC_POSTO2		N(133.2,8.22)	
LOC_POSTO3		N(136.8,6.61)	
LOC_POSTO4		N(133.3,7.90)	
LOC_POSTO5		N(136.7,6.89)	
LOC_POSTO6		N(135.5,10.74)	
LOC_TESTE			N(121.9,11.81)
LOC_CONTENÇÃO			N(130,5)
LOC_LABEL_ERROR			N(10,2)

Tabela 4.10 - Distribuição para os tempos de processamento coletados no Terceiro Período do Segundo Turno

POSTOS DE TRABALHO	ENT_KIT (tempos em seg)	ENT_AUX (tempos em seg)	ENT_CHICOTE (tempos em seg)
LOC_CEL1	N(132.6,19.45)		
LOC_CEL2	N(146,11.63)		
LOC_CEL3	N(133.4,5.76)		
LOC_CEL4	N(147.9,21.93)		
LOC_CEL5	N(133.6,9.94)		
LOC_POSTO1		N(133.6,10.23)	
LOC_POSTO2		N(135.7,9.66)	
LOC_POSTO3		N(136.3,8.78)	
LOC_POSTO4		N(133.2,6.13)	
LOC_POSTO5		-1.8e+003+L(1.95e+003, 11.)	
LOC_POSTO6		N(137.4,14,76)	
LOC_TESTE			N(122.1,17.07)
LOC_CONTENÇÃO			N(130,5)
LOC_LABEL_ERROR			N(10,2)

Tabela 4.11 - Distribuição para os tempos de processamento coletados no Quarto Período do Segundo Turno

POSTOS DE TRABALHO	ENT_KIT (tempos em seg)	ENT_AUX (tempos em seg)	ENT_CHICOTE (tempos em seg)
LOC_CEL1	N(143.3,9.30)		
LOC_CEL2	N(149.9,10.89)		
LOC_CEL3	N(133.9,8.54)		
LOC_CEL4	N(159,22.18)		
LOC_CEL5	N(134.9,8.18)		
LOC_POSTO1		N(144.7,8.89)	
LOC_POSTO2		N(134.7,11.20)	
LOC_POSTO3		N(135,7.22)	
LOC_POSTO4		N(131.1,6.48)	
LOC_POSTO5		N(138.40, 4.74)	
LOC_POSTO6		N(139.9,10.87)	
LOC_TESTE			N(139.5,20.07)
LOC_CONTENÇÃO			N(130,5)
LOC_LABEL_ERROR			N(10,2)

Para que o modelo entenda qual distribuição de dados deve ser utilizada em cada momento, foi utilizado o recurso de *Macros* do Promodel®.

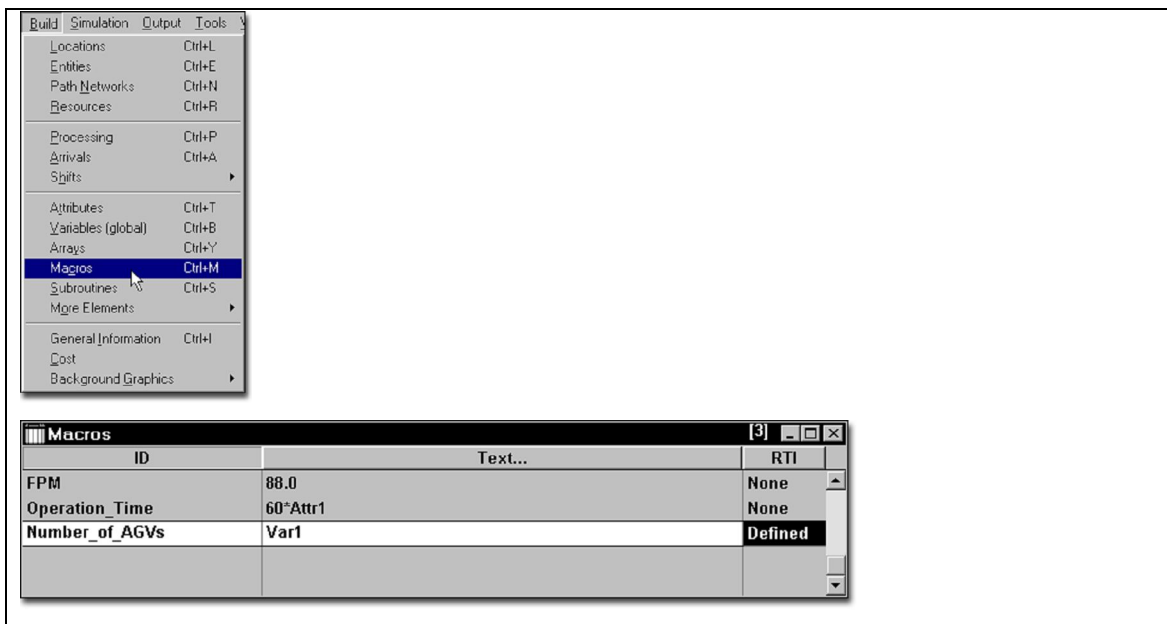
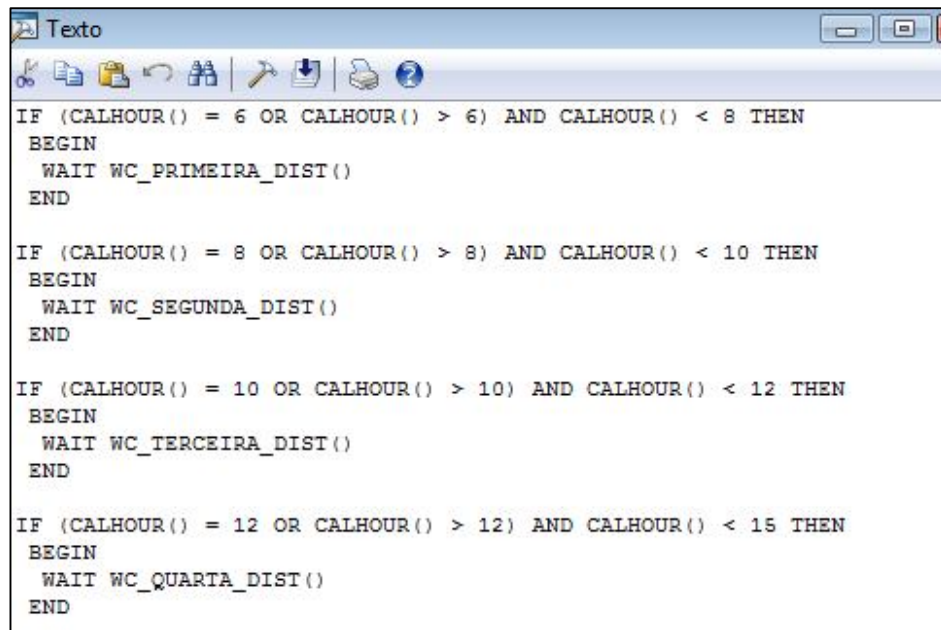


Figura 4.10 - Tela de Macros

Na tela *Macros*, é possível definir expressões e funções que são utilizadas frequentemente. No modelo em estudo foi definida uma lógica para que o modelo utilize cada uma das distribuições de dados em horários diferentes, assim, a cada 2 horas, o modelo utilizará a distribuição associada àquele período. A Figura 4.10 ilustra a tela de Macros do Promodel®.



```
IF (CALHOUR() = 6 OR CALHOUR() > 6) AND CALHOUR() < 8 THEN
BEGIN
  WAIT WC_PRIMEIRA_DIST()
END

IF (CALHOUR() = 8 OR CALHOUR() > 8) AND CALHOUR() < 10 THEN
BEGIN
  WAIT WC_SEGUNDA_DIST()
END

IF (CALHOUR() = 10 OR CALHOUR() > 10) AND CALHOUR() < 12 THEN
BEGIN
  WAIT WC_TERCEIRA_DIST()
END

IF (CALHOUR() = 12 OR CALHOUR() > 12) AND CALHOUR() < 15 THEN
BEGIN
  WAIT WC_QUARTA_DIST()
END
```

Figura 4.11 - Exemplo da lógica *Call Hour*

No editor de macros, os dois principais campos são:

- ID (Nome): Especifica o nome criado pelo usuário para identificar a macro.
- *Text* (Texto): Especifica um texto a ser submetido quando o “nome da macro” for “chamado”. Este texto pode ser uma expressão completa, um bloco de lógica ou parte de um bloco de lógica.

Na Figura 4.11, podemos notar que foram criados quatro grupos de horários. No primeiro horário, das 06h00min até as 08h00min, o modelo utilizará o arquivo externo da primeira distribuição, correspondente aos dados coletados no primeiro horário, cujo nome definido pelo usuário é de “WC_PRIMEIRA_DIST” (ID). No segundo horário, das 08h00min até as 10h00min, o modelo utilizará o arquivo externo da segunda distribuição,

correspondente aos dados coletados no segundo horário, cujo nome definido pelo usuário é de “WC_SEGUNDA_DIST” (ID), das 10h00min até as 12h00min, o modelo utilizará o arquivo externo da terceira distribuição, correspondente aos dados coletados no terceiro horário, cujo nome definido pelo usuário é de “WC_TERCEIRA_DIST” (ID), e das 12h00min até as 15h00min, o modelo utilizará o arquivo externo da quarta distribuição, correspondente aos dados coletados no quarto horário, cujo nome definido pelo usuário é de “WC_QUARTA_DIST” (ID). O mesmo procedimento foi seguido para todos os cenários dos primeiro e segundo turnos.

A função *call hour* utilizada na Figura 4.11 corresponde à hora do calendário que foi definida como parte do início da simulação com as opções de simulação. Uma vez que esta função está diretamente ligada ao relógio de 24 horas exibido na tela durante a simulação, CALHOUR () nunca irá retornar um valor superior a 23. É válido em qualquer lógica. CALHOUR () só funciona quando você seleciona a data do calendário na janela de opções da simulação.

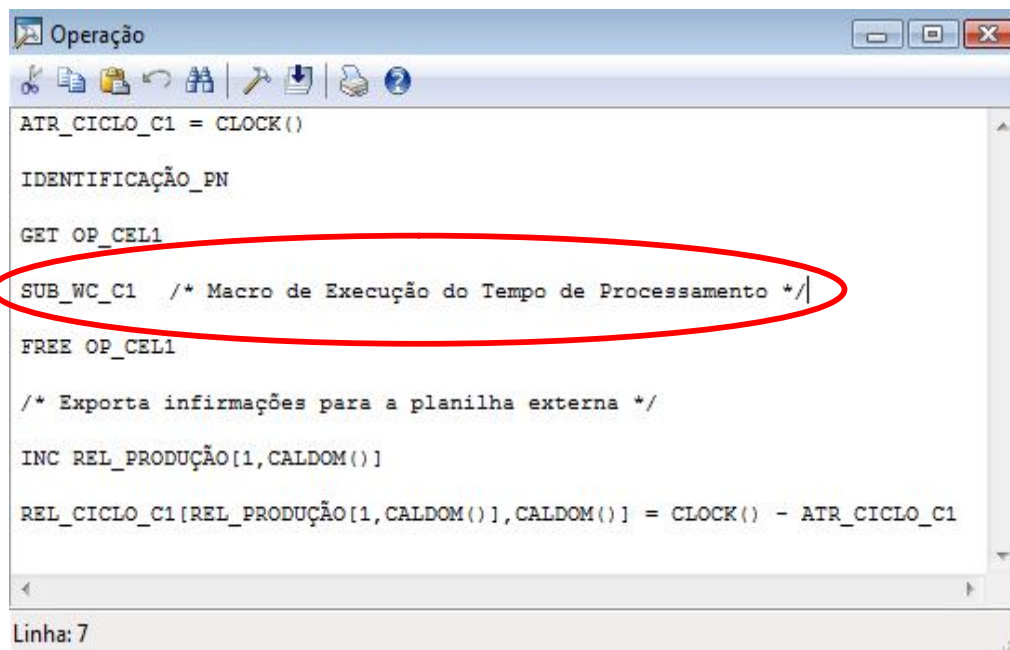
O exemplo a seguir programa uma mudança de pessoal utilizado para executar uma operação. Após a execução da simulação, que ocorre durante 18 horas, o técnico fica disponível para realizar a atividade, conforme mostrado abaixo:

- CALHOUR IF () > 18 THEN;
- Use operador para N (10,4);
- Use outro técnico para N (8,2).

Cada uma destas *Macros* possui também ID (nome de identificação definido pelo usuário) que é utilizado na tela *Processing* para carregar esta sub-rotina, conforme apresentado na Figura 4.12.

Na tela de Subrotinas, é possível definir um comando que pode ser chamado para executar um bloco de lógica e opcionalmente retornar a um valor. As subrotinas podem ter parâmetros (variáveis locais) que atuam como variáveis locais para a subrotina e que assumem os valores dos argumentos (por exemplo, expressões numéricas) passados para a subrotina.

Apesar das subrotinas e macros funcionarem de forma semelhante, elas têm diferenças sutis. Qualquer lógica pode utilizar macros e sub-rotinas. A principal diferença está na maneira como elas são utilizadas. As subrotinas só podem ser utilizadas quando você precisar passar argumentos, obter um valor de retorno, ou ativar a execução independente da lógica. As macros somente podem ser utilizadas para definir parâmetros de interface em tempo de execução.



```
ATR_CICLO_C1 = CLOCK()
IDENTIFICAÇÃO_PN
GET OP_CEL1
SUB_WC_C1 /* Macro de Execução do Tempo de Processamento */
FREE OP_CEL1
/* Exporta informações para a planilha externa */
INC REL_PRODUÇÃO[1,CALDOM()]
REL_CICLO_C1[REL_PRODUÇÃO[1,CALDOM()],CALDOM()] = CLOCK() - ATR_CICLO_C1
```

Linha: 7

Figura 4.12 - Exemplo da Sub-rotina

O procedimento apresentado acima foi seguido para os sete cenários apresentados nos primeiros e segundo turnos.

4.3 Implementação

Após a validação do modelo conceitual, foi possível converter o modelo conceitual em um modelo computacional através da utilização do *software* Promodel®.

Passo 2.1: Construção do modelo computacional

As informações requeridas junto ao objeto de estudo para a construção dos modelos computacionais foram definidas na fase de coleta de dados, conforme apresentado no Passo 1.5 (Modelagem dos dados de entrada).

Para a construção de um modelo computacional, o Promodel® apresenta os seguintes elementos: locais, entidades, recursos, processo e chegadas. As definições e o funcionamento dos principais elementos são mostrados a seguir:

- *Locations* (Locais): Os locais representam os postos físicos do sistema (máquinas, áreas de depósito, esteiras transportadoras) onde se realizam os processos. Estes elementos são utilizados para a representação das estações de trabalho, *buffers*, *conveyors* e filas. Neste elemento pode-se definir a capacidade, unidades (simples ou múltiplas), *setups*, manutenção, nível de detalhamento estatístico, além de regras de chegada e saída de materiais.
- *Resources* (Recursos): Os recursos são usados para transportar as entidades, executar operações, realizar manutenção nos locais, podendo ser pessoas ou equipamentos. Um sistema pode ter um ou mais recursos, sendo dotado de movimento ou não. Contudo, para cada recurso deve ser designada uma rede de caminho, ou seja, um percurso na qual a movimentação se dará. Nesse trabalho, os principais recursos analisados foram os operadores, que são responsáveis pela realização das atividades nesta linha de montagem.
- *Process* (Processo): O processo consiste em uma tabela onde são definidas as operações de cada entidade em cada local e o recurso necessário para esta operação, e uma tabela de rotas que define o destino e a movimentação de cada entidade, bem como o modo como se dá essa movimentação e os recursos necessários.
- *Entities* (Entidades): As entidades são os itens a serem processados pelo sistema, podendo ser: matéria-prima, produtos, *pallets*, pessoas ou documentos. As entidades possuem velocidades definidas, além de nível estatístico como os locais. Elas podem ser agrupadas ou divididas ao longo do processo produtivo, se movimentando de um local para outro utilizando uma rota definida ou uma rede de trabalho.

- *Arrivals* (Chegadas): As chegadas definem a entrada das entidades dentro do modelo, podendo ser definidas as quantidades, frequência e períodos de chegada, bem com a lógica de chegada. Pode-se também definir as chegadas através de um arquivo externo de chegada de peças referenciado no editor de arquivos.
- *Variables* (Variáveis): As variáveis podem ser globais ou locais. As variáveis globais são utilizadas para representar os valores numéricos mutáveis. As variáveis locais só estabelecem funções na parte da lógica em que são declaradas, podendo ambas conter tanto valores numéricos como reais. Uma variável global pode ser referenciada em qualquer lugar do modelo. Já uma variável local só pode ser referenciada dentro de um determinado bloco onde a mesma foi declarada.
- *Atributtes* (Atributos): Similares às variáveis, os atributos são anexados juntamente com entidades e locais específicos e geralmente contém informação sobre os mesmos. Podem conter valores reais ou inteiros. Os atributos podem ser classificados como *Entity Atributtes* e *Location Atributtes*. O atributo *Entity Atributtes* é anexado juntamente com a entidade e contém informação sobre esta entidade. Já o atributo *Location Atributtes* é anexado juntamente com um local específico e contém informação sobre este local. Nesta pesquisa, foram utilizados os dois tipos de atributos. O atributo *Entity Atributtes* foi utilizado para definir o tipo de *Part Number*. Já o atributo *Location Atributtes* foi utilizado para o cálculo do tempo de processamento de cada um dos postos de trabalho existentes nessa linha de montagem.

Para a confecção do modelo computacional, foram utilizadas as seguintes informações: quantidade de modelos de veículo, tempo de processamento de cada modelo e a porcentagem de produção dentro do volume total. Espera-se deste modelo inicial analisar como se comporta a linha (*output* de peças) verificando a porcentagem de utilização dos locais, balanceamento do conteúdo de montagem teórico em cada estação, auxiliando a divisão de estação real. O volume considerado é de 189 pçs/turno ou de 23 pçs/hora e as informações descritas anteriormente estão apresentadas na Tabela 4.12:

Tabela 4.12- Informações sobre os produtos

Modelo de veículo	Mix de produção dos modelos (%)	Tempo de processamento (Min)
01	91,6%	29,82
02	8,4 %	2,69
03	0 %	0

De posse das informações da Tabela 4.12, e observado o mix de produção dos três produtos produzidos na linha de produção do presente estudo, optou-se por analisar apenas o Modelo de veículo 01 (em destaque), uma vez que essa produção corresponde a 91,6% da produção total da linha.

Além das informações apresentadas anteriormente, foi definido ainda o tempo total disponível por turno de trabalho bem como a quantidade de turnos, e o percentual de parada não programada (*Downtime*) aceitável para este projeto. Segue abaixo as informações:

- Tempo disponível por turno: 8,19 horas.
- Quantidade de turnos de trabalho por dia: 02 (dois) turnos.
- Percentual de paradas não-programadas aceitável: 10% do tempo disponível por turno.

De posse de todas estas informações, foi iniciada a definição de quantidade de postos de trabalho necessária para atender à produção do volume contratado. Nesta etapa, utilizou-se a ferramenta interna da empresa denominada de Controle 17, apresentada nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, a partir da qual todas as informações acima foram inseridas no modelo e como saídas foi obtido o número de postos de trabalho.

O processo de fabricação do produto em estudo é composto por uma fase inicial (pré-montagem) realizada por células de kits de montagem e, posteriormente, enviada para um *conveyor* (montagem) onde cada um destes kits de montagem é interligado formando o produto final. Após o produto final sair do *conveyor*, ele é direcionado para o processo de Teste Elétrico e posteriormente para o processo de Embalagem. A Tabela 4.13 mostra um resumo da quantidade de células de kit, postos de montagem, teste elétrico e embalagem bem como a quantidade de linhas de produção.

Tabela 4.13 - Quantidade de postos de trabalho da linha em estudo

Classificação	Célula de kit	Montagem	Célula de teste	Célula de embalagem
Quantidade de operadores	05	06	01	01
Quantidade mesas	03	06	01	01

Como explicado anteriormente, o produto processado na linha em estudo passa por uma fase de pré-montagem nas células de kit e depois é encaminhado para o *conveyor* onde é realizada a união de todos os kits de montagem (montagem final). O início da produção dá-se através da chegada da Ordem de Produção ou também conhecida como Manifesto nas células de kits.

Para a confecção do modelo computacional, primeiramente, foram definidas as *Locations* (locais), onde se realizam os processos. Foram criadas vinte e seis *locations*. Vale ressaltar algumas características de algumas das *locations*:

- A *Location* *Loc_Shutel* consegue armazenar um total de dez unidades da entidade *Submontagem*.
- A *Location* *Loc_Conveyor* é formada por seis mesas. Cada mesa possui setenta e duas polegadas e a distância entre as mesas é de nove polegadas. Dessa forma, o comprimento do *conveyor* é 12,344 metros.
- As entidades que são processadas nas *locations* *Loc_CEL1*, *Loc_CEL2*, *Loc_CEL3* e *Loc_CEL4* se movem sobre um *Skate*.
- As entidades que são processadas nas *locations* *Loc_POSTO1*, *Loc_POSTO2*, *Loc_POSTO 3*, *Loc_POSTO 4* e *Loc_POSTO 5* se movem sobre um *Conveyor*.
- Em todas as *locations* que possuem um operador foi inserido um indicador.
- A linha em estudo possui 06 (seis) mesas de montagem em um *conveyor*.

Após a definição das *Entitys* (entidades) do modelo, foi criado um *layout* para o modelo computacional, utilizando-se a biblioteca gráfica desenvolvida para este modelo, denominada de *Particular.GLB*.

Na tela *Entity* foram criadas 03 (três) entidades básicas e (01) uma entidade auxiliar, a ordem de produção (Ent_Manifesto), o kit de montagem (Ent_Kit), o chicote (Ent_Chicote) e a entidade auxiliar (Ent_Aux), respectivamente, sendo que a descrição de cada uma delas é dada a seguir:

- Ent_Manifesto: Entidade de chegada do sistema, representa a ordem de produção do produto em estudo.
- Ent_Kit: Entidade que representa o material processado.
- Ent_Chicote: Entidade que representa o produto na fase de montagem final.
- Ent_Auxiliar: Não tem aspecto gráfico.

Na tela de *Path Networks* foram definidos os caminhos utilizados pelas entidades e pelos recursos para se moverem no sistema. Os caminhos foram definidos em termos de comprimento, distância e velocidade de movimento.

Na tela *Resources* (recursos) foram inseridos doze operadores existentes na linha de montagem do presente estudo. Para cada recurso foi definida uma especificação, para identificar qual a rede percorrida por cada operador e também a velocidade de cada um. Desses doze operadores, cinco atuam na célula de kit, seis operadores atuam no *conveyor* e um operador atua na célula de teste e embalagem.

Na tela *Process* (processo) foram definidos as operações ocorridas em cada entidade, a identificação da *location* onde ocorrem, o *output*, o destino, a regra e a movimentação de cada entidade.

Com a ferramenta *Graphic Editor* do Promodel®, uma biblioteca específica foi desenvolvida para ser utilizada na construção do modelo, denominada de Particular.GLB.

Para o modelo em estudo foi necessária a criação dos seguintes elementos no *Graphic Editor*:

- Percheiros: Os percheiros são as bancadas utilizadas para construção de kits de montagem. Nos percheiros estão dispostos os cabos e conectores. Estes kits de montagem são pré-ligações destes cabos e conectores.
- Triângulos: Os triângulos são equipamentos em formato de um triângulo com três lados sendo um lado para consumo, outro de espera e o terceiro de produção

(abastecimento). Utilizado para fazer a conexão entre a bancada de percheiro e o posto de montagem final que irá utilizar o kit de montagem.

- *Shuttle*: O *shuttle* é uma ferramenta de conexão com a mesma finalidade do Triângulo, porém difere do anterior pelo fato de ser gravitacional e utilizar o conceito *First In First Out*.
- Mesa de Montagem: A mesa de montagem é uma bancada utilizada para a montagem final do chicote elétrico. Possui tamanho padronizado variando somente o comprimento sempre em 36 polegadas (36, 72, 108, 144,...).
- Rack de Componentes: O rack de montagem é uma bancada utilizada para dispor os componentes (conectores, tubos, fitas de PVC, presilhas, etc) utilizados na mesa de montagem final.
- *Conveyor*: O *conveyor* é uma esteira (carrossel) utilizada para transporte de mesas de montagem.
- Mesa de Teste Elétrico: A mesa de teste elétrico é uma bancada utilizada para teste elétrico final do chicote.
- Mesa de inspeção: A mesa de inspeção é uma bancada utilizada para fazer a inspeção de qualidade e de dimensional do chicote.
- *Label Error*: O *labor error* é uma bancada que possui um computador e é utilizada para conferência e direcionamento correto dos chicotes após o teste elétrico para o seu devido *pallet* de embalagem.
- Cabide de Peças: O cabide de peças é utilizado para posicionar peças durante o processo.
- Kit de montagem: O kit de montagem é uma pré-montagem feita do chicote realizada nos percheiros.
- Chicote: O chicote é o produto final propriamente dito.

O modelo computacional desenvolvido nesta pesquisa está apresentado na Figura 4.13.

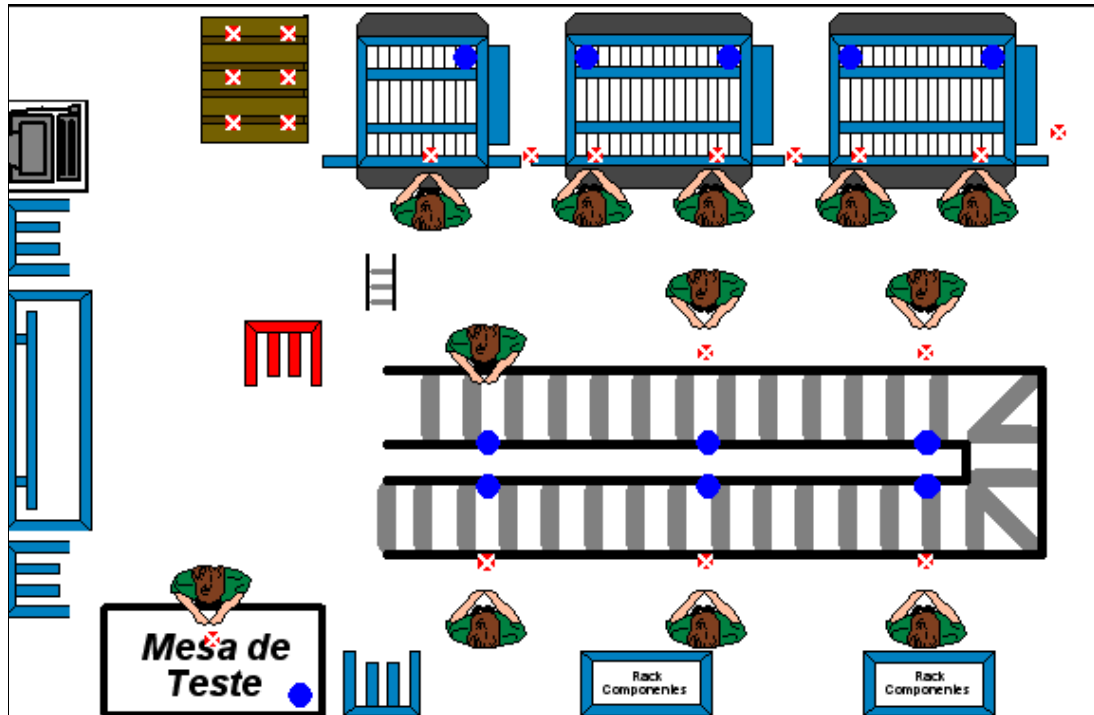


Figura 4.13: Modelo computacional do sistema

Neste modelo, utilizou-se a *Location Esteira* do Promodel®. A utilização deste recurso deve-se ao fato de ser mais fácil configurar a velocidade e comprimento total do *conveyor*. Porém, verificou-se uma dificuldade de simular a condição real do *conveyor* onde a entidade chicote é processada durante o seu movimento, pois o Promodel® permite que as operações de processamento ocorram no início da esteira ou no final.

Para resolver esta dificuldade foi necessária a criação de uma nova entidade sem aspecto gráfico (*Ent_Aux*). Esta nova entidade tem por função de caminhar por todos os postos de trabalho do *conveyor* em paralelo à movimentação da entidade chicote na esteira. Com isto, se a velocidade da esteira estiver configurada conforme o ciclo da linha, as duas entidades (*Ent_Aux* e *Ent_Chicote*) deverão chegar ao final do *conveyor* simultaneamente. Porém, para garantir que todos os postos de trabalho já processaram a entidade *Ent_Aux* foi utilizado o comando *Join* no final da esteira para juntar a entidade *Ent_Aux* à entidade *Chicote*.

Passo 2.2: Verificação do modelo computacional

Segundo Sargent (2009), a verificação do modelo computacional é definida para assegurar que a programação do modelo computacional e a implementação do modelo conceitual estão corretas.

Portanto, nessa fase, foram realizadas algumas execuções do modelo para verificar se o modelo computacional estava seguindo a lógica apontada no modelo conceitual. Erros na programação foram identificados, através de depuradores, presentes no próprio *software* de simulação utilizado nesta pesquisa. Uma vez validada a verificação do modelo, foi possível registrar o modelo computacional.

Passo 2.3: Validação do modelo operacional

Segundo Sargent (2009), a validação do modelo operacional determina se o comportamento da saída do modelo de simulação tem a precisão necessária para a finalidade do modelo sobre o domínio de aplicação a que o modelo se destina. Em outras palavras, validar um modelo é avaliar o quanto ele se aproxima do sistema real, assegurando que o modelo serve para o propósito que foi criado.

Para a análise do processo de validação do modelo operacional, dentre as técnicas de validação propostas por Sargent (2009) destaca-se a validação pela animação do modelo, a validação por meio de comparação do modelo simulado com outros modelos analíticos, a validação por face e a validação pelo histórico de produção do modelo real em relação ao modelo simulado.

Passo 2.3.1: Validação por animação

Nesta fase, verificou-se se o modelo computacional está funcionando graficamente conforme o modelo pré-estabelecido pelo especialista de desenvolvimento do sistema. Esta validação foi realizada através da comparação da representação do sistema, Folha de Trabalho Padronizado, desenhada pelo especialista, conforme mostrada na Figura 4.1, com a animação

do modelo (Tela de *Processing* do modelo computacional) gerada pelo *software* Promodel®, como mostrada na Figura 4.15.

Na Folha de Trabalho Padronizada, o especialista dispõe de todas as informações importantes para o desenvolvimento do modelo computacional, por exemplo, tempo de ciclo de todas as peças, o *layout* da linha de produção (disposição dos equipamentos), o fluxo pelo qual as peças passaram, a forma como as peças transitaram pelo sistema (qual operador move a peça e para qual processo).

Dessa forma, os especialistas responsáveis pelo desenvolvimento do sistema compararam o fluxo de movimentação das entidades sobre o *layout* (primeiramente, observado através da tela de *Processing* do Promodel®, onde cada linha do processo possui uma seta indicando o fluxo da entidade e em segundo lugar pela observação da animação do modelo durante a sua execução) com a Folha de Trabalho Padronizado.

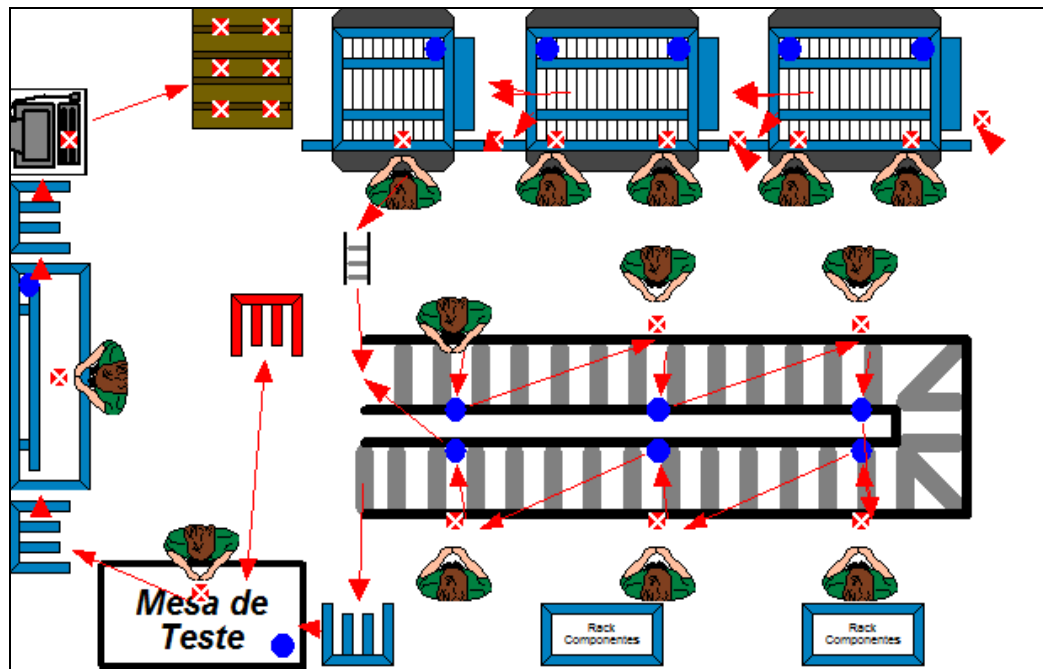


Figura 4.14 - Tela de *Processing* do modelo computacional

Passo 2.3.2: Validação por comparação com outros modelos analíticos

Este tipo de validação, no caso específico deste estudo, foi realizado comparando o total de peças produzidas por hora no primeiro turno apresentado no Controle 17, como mostrado na Figura 4.15, com a média do total de peças produzidas por hora pelo Modelo de Validação, como mostrado na Tabela 4.14.

CONTROLE 17 - MONTAGEM												
Total Min	Refeicao	Reuniao	Ginastica	Café / banheiro	Set-up							
1149	120	20	10	16	0	DATA : 12/10/2008						
HRS/TURNO:			8,19	MIN./TURNO		491,5	QTD. TURNO:					2
FORECAST DIARIO (Atual)	MIX (%) PROD.	MESAS POR LINHA	QTD. DE LINHAS	OPERADORES POR LINHA	TEMPO DE MONTAGEM (min.)	TEMPO CICLO (min.)	TEMPO CICLO (seg.)	CAPAC. POR LINHA / TURNO	CAPAC. TOTAL	CAPAC. PRODUÇÃO	Peças por Hora	
326,0	91,6%	6	1	6	15,61	2,60	156,11	189	378	106%	23	
30,0	8,4%	6	1	6	15,18	2,53	151,81	194	389	109%	24	
0,0	0,0%	6	1	6	15,18	2,53	151,81	194	389	109%	24	
356	100%	6	1	6	15,57	2,60	156	189	379	106%	23	
CONTROLE 17 - KIT												
Total Min	Refeicao	Reuniao	Ginastica	Café / banheiro	Set-up							
1149	120	20	10	16	0	DATA : 12/10/2008						
HRS/TURNO:			8,19	MIN./TURNO		491,5	QTD. TURNO:					2
FORECAST DIARIO (Atual)	MIX (%) PROD.	MESAS POR LINHA	QTD. DE LINHAS	OPERADORES POR LINHA	TEMPO DE MONTAGEM (min.)	TEMPO CICLO (min.)	TEMPO CICLO (seg.)	CAPAC. POR LINHA / TURNO	CAPAC. TOTAL	CAPAC. PRODUÇÃO	Peças por Hora	
326,0	91,6%	1	1	5	12,97	2,59	155,67	189	379	106%	23	
30,0	8,4%	1	1	5	12,72	2,54	152,59	193	387	109%	24	
0,0	0,0%	1	1	5	12,72	2,54	152,59	193	387	109%	24	
356	100%	1	1	5	12,95	2,59	155	190	380	107%	23	
CONTROLE 17 - TESTE e EMBALAGEM												
Total Min	Refeicao	Reuniao	Ginastica	Café / banheiro	Set-up							
1149	120	20	10	16	0	DATA : 12/10/2008						
HRS/TURNO:			8,19	MIN./TURNO		491,5	QTD. TURNO:					2
FORECAST DIARIO (Atual)	MIX (%) PROD.	MESAS POR LINHA	QTD. DE LINHAS	OPERADORES POR LINHA	TEMPO DE MONTAGEM (min.)	TEMPO CICLO (min.)	TEMPO CICLO (seg.)	CAPAC. POR LINHA / TURNO	CAPAC. TOTAL	CAPAC. PRODUÇÃO	Peças por Hora	
326,0	91,6%	1	1	2	3,97	1,99	119,20	247	495	139%	30	
30,0	8,4%	1	1	2	3,97	1,99	119,20	247	495	139%	30	
0,0	0,0%	1	1	2	3,97	1,99	119,20	247	495	139%	30	
356	100%	1	1	2,0	3,97	1,99	119	247	495	139%	30	

Figura 4.15 - Controle 17 para Validação

Tabela 4.14 - Resultados gerados pelo modelo de validação

Quantidade	Total produzido/hora (peças)	Tempo de Processamento (tempos em seg)	Total produzido/turno (peças)
1	22,79	160,09	181
2	22,81	160,69	180
3	22,92	158,88	182
4	22,90	160,00	181
5	22,86	159,83	181
6	23,17	157,49	184
7	23,06	158,24	183
8	22,81	160,12	181
9	22,93	159,63	181
10	22,88	159,49	181
11	22,71	161,28	179
12	22,74	161,62	179
13	23,17	157,54	184
14	22,97	159,26	182
15	22,51	162,06	179
16	22,89	159,81	181
17	22,96	158,80	182
18	22,53	163,35	177
19	22,70	161,60	179
20	23,06	158,81	182
21	22,80	159,42	182
22	23,05	158,14	183
23	23,05	158,63	182
Média	22,88	159,77	181,13

Ainda nesta fase de validação, foi inserido um quadro de contadores no modelo computacional, como mostrado na Figura 4.16, para comparar de maneira dinâmica a quantidade de peças por hora, o tempo de ciclo e o total de peças produzidas por turno (gerados pelo modelo de validação) com os dados do Controle 17, mostrado na Figura 4.15.

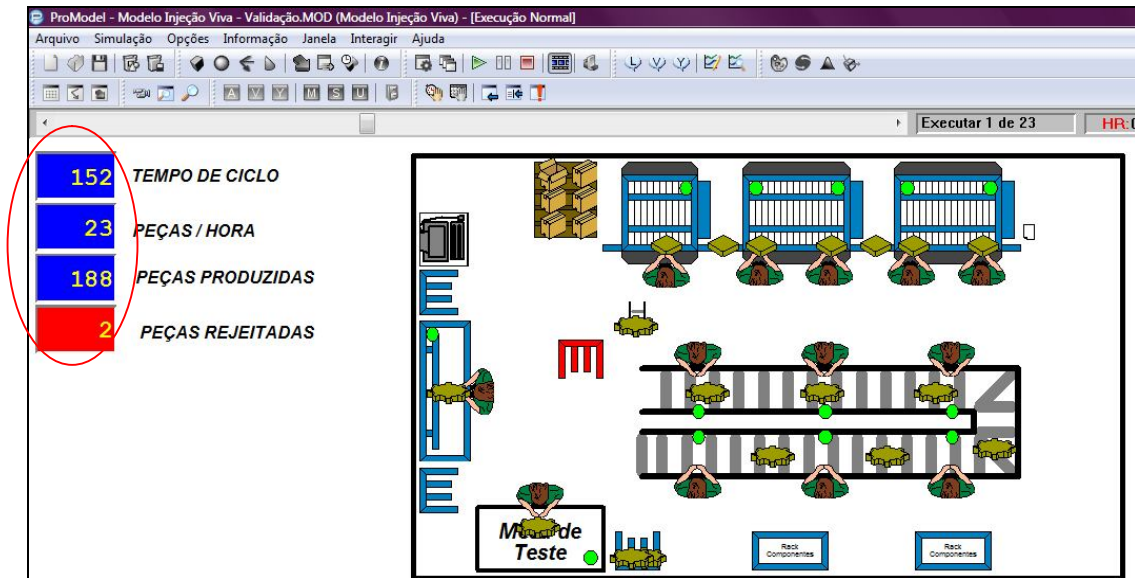


Figura 4.16 - Quadro de Contadores no Modelo Computacional

Passo 2.3.3: Validação face-a-face

Este tipo de validação foi realizado com a participação dos especialistas de desenvolvimento do sistema de manufatura, que verificaram se o modelo computacional estava funcionando conforme a idéia planejada por eles para o sistema. Este tipo de validação englobou também os dois processos anteriores de validação.

Passo 2.3.4: Validação pelo histórico de produção do modelo real em relação ao modelo simulado

O modelo computacional foi validado estatisticamente com os tempos de processamento coletados na cronoanálise em diferentes períodos na linha de montagem.

A variável escolhida para a validação estatística foi o total de peças produzidas por hora. Este modelo de simulação foi executado para 8,06 horas, com vinte e três réplicas, utilizando os tempos de processamento da cronoanálise coletados nos quatro períodos do primeiro turno, que estão apresentados na Tabela 4.3.

Inicialmente, optou-se por comparar os resultados gerados pelo modelo com os resultados obtidos no sistema real, considerando-se os tempos de processamento coletados em

cada um dos quatro períodos analisados durante cada turno. No entanto, a validação nesse caso não foi possível.

Assim, de posse dos dados da cronoanálise para os quatro períodos do primeiro turno para cada posto de trabalho, optou-se por agrupar os dados coletados nos quatro períodos para cada posto de trabalho, como mostram as Tabelas 4.15a, 4.15b e 4.15c.

Tabela 4.15a - Tempos de processamento da Cronoanálise para os quatro períodos (tempos em seg)

Célula 01	Célula 02	Célula 03	Célula 04	Célula 05	Posto 01	Posto 02	Posto 03	Posto 04	Posto 05	Posto 06	Teste
140	144	137	137	155	149	130	149	141	148	140	147
146	147	138	139	141	148	127	139	149	158	138	132
145	137	150	139	137	139	132	146	144	154	137	146
141	145	142	133	146	138	123	143	140	150	131	136
140	138	147	134	132	138	124	146	143	151	144	147
139	136	144	148	135	132	129	154	149	140	149	136
136	144	151	140	130	148	123	150	152	147	150	134
134	144	145	145	141	150	139	143	150	148	135	147
128	138	147	138	132	141	130	148	144	148	138	138
135	138	143	133	134	152	127	139	152	156	141	146
130	135	148	146	143	150	137	147	153	149	140	155
136	145	147	138	140	142	133	148	150	144	137	143
140	144	150	140	140	139	131	137	147	149	133	147
141	138	140	135	145	138	127	146	138	150	139	134
132	140	142	136	144	142	135	144	140	151	144	137
128	136	143	137	148	147	136	138	142	142	149	143
129	144	148	140	147	145	128	138	140	139	150	135
131	147	145	142	151	138	130	149	152	155	140	145
137	136	151	137	142	149	128	147	153	150	151	130
138	133	145	130	143	143	126	148	148	162	161	137
129	153	137	145	124	144	124	138	140	157	154	146
151	148	135	139	124	159	125	144	150	153	143	144
128	154	138	136	130	136	121	142	151	143	147	144
152	161	150	146	125	142	132	146	144	154	148	136
134	128	143	132	130	156	123	145	142	145	153	148
132	130	159	149	136	143	121	140	149	156	153	152
143	152	150	152	145	145	128	141	150	150	144	145
150	135	147	142	142	164	124	154	154	144	148	142

Capítulo 04 – Aplicação do Método

Tabela 4.15b - Tempos de processamento da Cronoanálise para os quatro períodos (tempos em seg)

Célula 01	Célula 02	Célula 03	Célula 04	Célula 05	Posto 01	Posto 02	Posto 03	Posto 04	Posto 05	Posto 06	Teste
128	155	161	148	142	142	135	148	151	152	156	136
140	135	130	139	146	156	128	143	143	151	153	141
152	152	144	131	129	151	129	140	140	149	158	146
146	150	154	141	129	145	128	130	142	158	150	147
148	140	160	148	130	147	129	139	143	146	155	143
130	150	142	156	129	151	129	134	140	158	137	151
139	146	151	160	133	155	122	151	150	151	159	144
148	138	139	145	132	153	133	153	156	151	148	151
145	133	139	147	150	154	125	150	150	158	146	129
133	129	135	144	136	144	127	155	153	154	154	147
153	137	141	146	141	148	130	148	154	153	150	140
140	138	142	137	136	149	135	142	149	148	129	141
138	135	137	138	133	137	126	143	148	149	135	148
151	147	138	139	144	138	122	135	149	143	144	147
155	143	144	139	131	148	127	142	140	159	146	161
154	150	159	140	129	148	129	146	141	144	147	141
155	137	142	142	155	149	125	133	153	149	142	131
133	138	143	144	145	159	130	132	149	140	144	146
131	125	147	143	144	156	129	142	153	157	149	141
130	132	140	168	143	156	133	148	156	156	150	135
141	136	137	142	150	153	128	145	155	152	153	135
148	147	150	149	155	153	133	140	154	155	141	151
129	122	142	148	150	156	135	136	149	140	149	148
124	146	139	138	144	139	131	146	153	151	140	150
147	135	149	135	140	138	132	143	153	164	134	155
140	145	145	138	137	129	129	130	158	133	147	142
140	146	166	136	139	130	125	135	148	139	151	130
156	148	144	137	129	138	128	147	151	156	144	134
153	150	145	138	135	146	122	145	153	159	140	144
152	152	145	133	138	136	123	141	152	149	138	145
129	134	147	135	145	156	134	138	145	150	142	129
148	153	144	138	138	138	138	137	152	148	147	132
143	142	140	144	147	151	135	136	143	147	144	158
148	149	137	146	141	156	134	140	154	152	136	138
151	137	142	148	146	147	136	140	150	152	129	142
136	135	150	146	142	147	128	135	142	149	143	153
154	151	154	139	138	148	128	142	149	150	150	153
140	132	143	137	131	146	130	133	152	144	155	143

Tabela 4.15c - Tempos de processamento da Cronoanálise para os quatro períodos (tempos em seg)

Célula 01	Célula 02	Célula 03	Célula 04	Célula 05	Posto 01	Posto 02	Posto 03	Posto 04	Posto 05	Posto 06	Teste
154	134	142	142	142	137	127	135	150	153	129	159
127	131	149	148	135	147	133	137	151	143	155	158
123	138	139	146	150	148	134	133	142	149	148	158
147	150	138	138	150	149	133	137	150	150	156	149
135	136	144	135	149	156	132	138	146	153	150	145
131	121	142	134	138	153	132	148	158	155	143	144
138	139	138	146	141	156	130	145	139	150	150	175
122	132	137	148	132	150	133	138	153	140	152	145
124	122	139	142	144	149	127	146	150	148	153	148
126	134	146	147	130	138	128	142	148	150	147	156
130	133	159	149	134	137	129	147	156	142	148	154
134	144			141	153	127	143	149	153	147	157
126	146			131	141	128	144	144	140	146	131
131	137			154	146	130	139	148	142	153	142
142	139			131	136	132	146	149	147	144	146
136	147			130	150	131	147	153	148	151	146
142	141			145	154	124	145	155	153	152	157
147	152			144	150	124	151	152	142		
149				138	149	126	151	149	143		
					148			148			
					145			147			
								146			

De posse dos dados apresentados na Tabela 4.15, foram identificados os *outliers* da distribuição de cada posto de trabalho e estes foram eliminados. A partir daí, foi realizado o teste de normalidade através do *software* Minitab® para avaliar se os dados poderiam ser ajustados a uma distribuição normal e para identificar os parâmetros (média e desvio padrão) dos dados normais. Os resultados do teste de normalidade estão apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Resultados do Teste de Normalidade para o Primeiro Turno

Postos de Trabalho	<i>P-value</i>	Distribuição
Célula 01	0,02	Não é Normal
Célula 02	0,06	Normal
Célula 03	0,01	Não é Normal
Célula 04	0,01	Não é Normal
Célula 05	0,07	Normal
Posto 01	0,00	Não é Normal
Posto 02	0,28	Normal
Posto 03	0,33	Normal
Posto 04	<0,005	Não é normal
Posto 05	0,16	Normal
Posto 06	0,12	Normal
Teste	0,12	Normal

Pela interpretação da Tabela 4.16, os dados da cronoanálise referentes aos postos de trabalho (Célula 01, Célula 03, Célula 04, Posto 01 e Posto 04) não podem ser ajustados à Distribuição Normal, já que o valor do *p-value* para esses postos de trabalho foi menor do que 0,05. Dessa forma foi necessário utilizar o pacote Stat Fit do *software* Promodel® para determinar qual a distribuição de probabilidades fornecia a melhor representação para os dados não normais. Com o Stat Fit foi possível também identificar os parâmetros relevantes para a distribuição especificada.

De posse da identificação da distribuição dos dados coletados, e dos parâmetros correspondentes a cada distribuição, os dados foram inseridos no Promodel® através de uma planilha em Excel, como mostra a Tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Distribuição e Parâmetros dos dados da cronoanálise do primeiro turno – Modelo para Validação

POSTOS DE TRABALHO	ENT_KIT (tempos em seg)	ENT_AUX (tempos em seg)	ENT_CHICOTE (tempos em seg)
LOC_CEL1	115+L(24.9, 8.82)		
LOC_CEL2	N(140.7, 8.198)		
LOC_CEL3	106+L(39.1, 6.71)		
LOC_CEL4	36.1+L(105, 5.2)		
LOC_CEL5	N(139.3, 7.663)		
LOC_POSTO1		-1.07e+003+ L(1.21e+003, 6.61)	
LOC_POSTO2		N(129.1, 4.171)	
LOC_POSTO3		N(142.6, 5.771)	
LOC_POSTO4		U(147, 9.)	
LOC_POSTO5		N(149.5, 5.887)	
LOC_POSTO6		N(145.7, 7.23)	
LOC_TESTE			N(144.1, 7.879)
LOC_CONTENÇÃO			N(130, 5)
LOC_LABEL_ERROR			N(10, 2)

O total de peças produzidas por hora pelo modelo de validação foi obtido pela distribuição das 23 réplicas, como apresentado na Tabela 4.18. Dados históricos do total produzido por hora, para o mesmo período, foram extraídos do sistema ERP da empresa, referente ao mês de novembro de 2009, para o primeiro turno, conforme apresentado na Tabela 4.18.

De posse dos dados obtidos pelo modelo de simulação e pelo histórico de produção da empresa, foi realizado o procedimento de validação estatística, utilizando o *software Minitab®*.

Primeiramente, verificou-se se os dados apresentavam valores não usuais (*outliers*) através de uma carta de controle para variáveis individuais (*Variables Charts for Individuals*).

Tabela 4.18 - Total produzido por hora pelo modelo e pelo sistema real

Quantidade	Modelo (peças)	Sistema Real (peças)
1	22, 7939	23, 7187
2	22, 8115	23, 0024
3	22, 9242	22, 8856
4	22, 9054	22, 7381
5	22, 8675	29, 3970
6	23, 1737	22, 2084
7	23, 0636	23, 0398
8	22, 8122	23, 8329
9	22, 9325	22, 9091
10	22, 8867	23, 3735
11	22, 7172	22, 9851
12	22, 7486	23, 6585
13	23, 1769	22, 9730
14	22, 9765	23, 0398
15	22, 5112	18, 5044
16	22, 8980	25, 7106
17	22, 9604	23, 4375
18	22, 5362	22, 4138
19	22, 7064	22, 3669
20	23, 0694	21, 3018
21	22, 8095	8,6 391
22	23, 0541	22, 9833
23	23, 0551	24, 1420

A partir daí, foi realizado um teste de aderência à distribuição Normal, para os dados do modelo e do histórico de produção. Foi constatado que os dados do total produzido/hora pelo modelo podem ser ajustados como uma distribuição Normal, por apresentar *P-value* igual a 0,726, ou seja, superior a 0,05, conforme apresentado na Figura 4.24. Da mesma forma, foi constatado que os dados do total produzido/hora pelo sistema real também podem

ser ajustados como uma distribuição Normal, por apresentar *P-value* igual a 0,226, ou seja, superior a 0,05, conforme apresentado na Figura 4.25.

Tabela 4.19 - Resultados do Teste de Normalidade para os dados de produção

Dados	<i>P-value</i>	Distribuição
Peças por hora produzidas pelo modelo	0,726	Normal
Peças por hora produzidas pelo sistema real	0,226	Normal

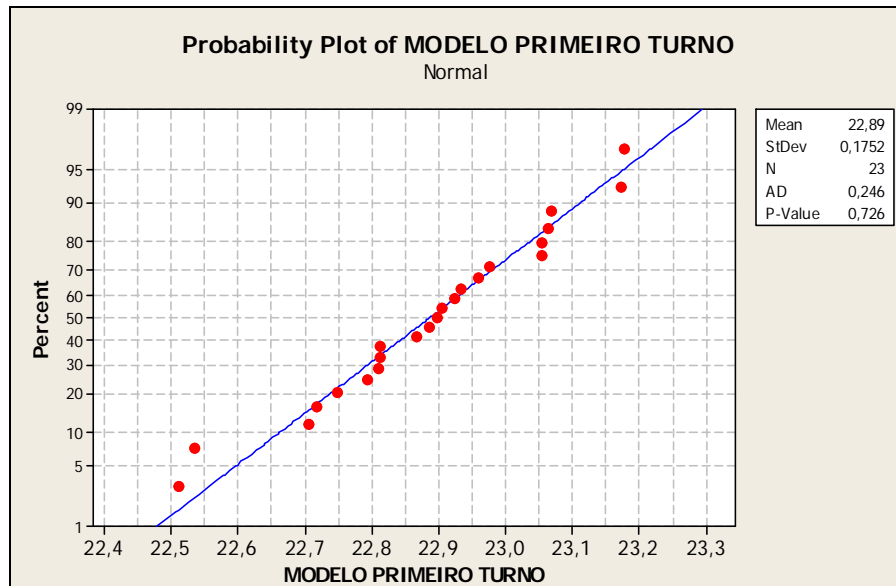


Figura 4.17 - Teste de Normalidade: Peças/Hora produzidas pelo Sistema Real

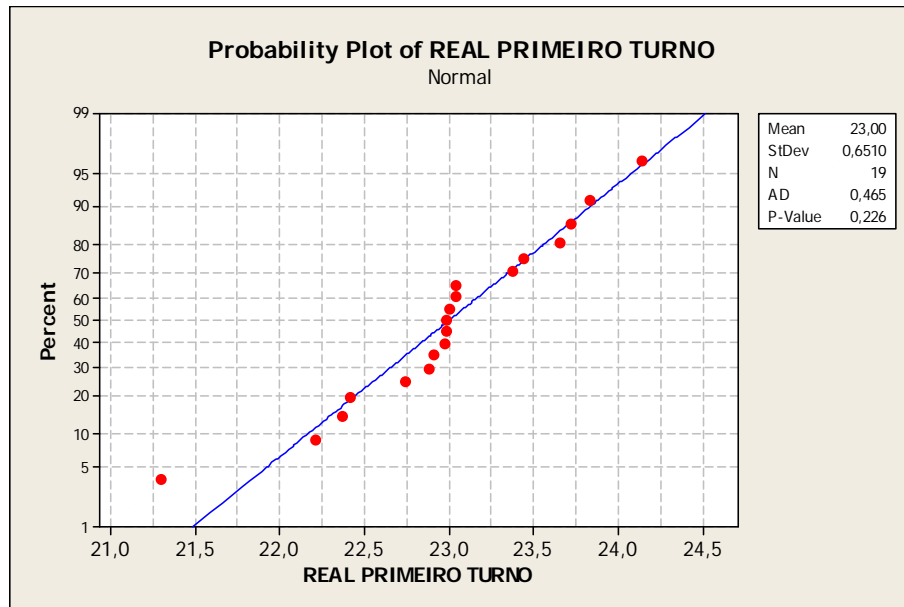


Figura 4.18 - Teste de Normalidade: Peças/Hora produzidas pelo Modelo

Sendo assim, o próximo passo foi a realização de um Teste F, que testa a hipótese de que os dois conjuntos de dados (real e simulado) tem variâncias iguais. Foi verificado através do Teste F que os dois conjuntos de dados (real e simulado) não possuem variâncias iguais, apresentando *P-value* igual a 0,00, ou seja, menor que 0,05. Esta informação não invalida o modelo, mas orienta a escolha do teste final de médias, que irá demonstrar a rejeição ou não da validação, conforme apresentado na Figura 4.19.

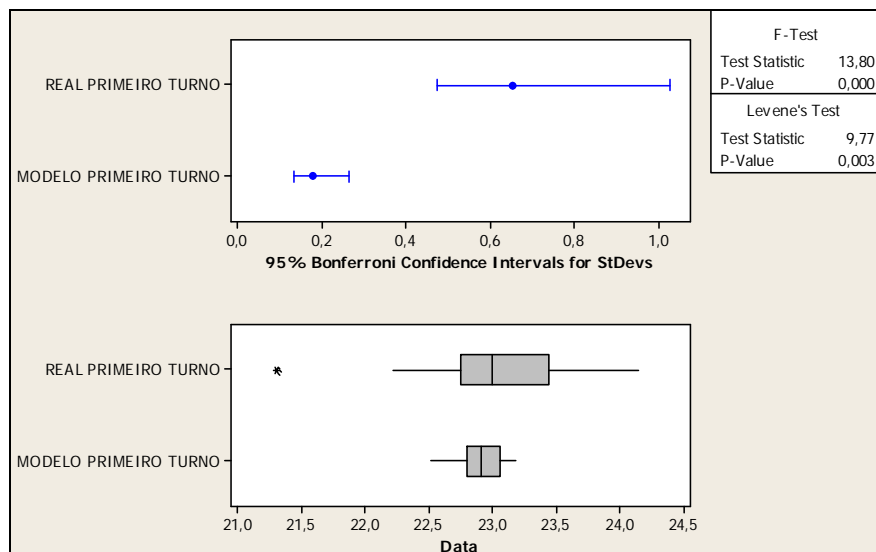


Figura 4.19 - Teste F: Peças/Hora produzidas pelo Sistema Real X Peças/Hora geradas pelo Modelo

Neste caso, por se tratar de dados normais, utilizou-se o teste 2 *Sample T* para testar a hipótese nula de igualdade entre as médias da população, para dados normais.

Foi verificado através do Teste 2 *Sample T* que os dois conjuntos de dados (real e simulado) possuem médias iguais, apresentando *P-value* igual a 0,467, ou seja, maior que 0,05, como mostra a Tabela 4.19.

As hipóteses do teste 2 *Sample T* são:

- H0: As médias da amostra do Modelo de Validação são iguais às médias da amostra do Sistema Real.
- H1: As médias da amostra do Modelo de Validação são diferentes das médias da amostra do Sistema Real.

Tabela 4.20 - Resultado do Teste 2 *Sample T*

Teste 2 <i>Sample T</i>		<i>P – Value</i>	<i>Resultado</i>
Modelo	Sistema real	0, 467	Aceita H0: Modelo Validado

Nesse caso, podemos afirmar que o modelo computacional está validado estatisticamente. Em outras palavras, diz-se que o modelo computacional está apto para receber experimentações. Tem-se então o modelo operacional ou experimental da célula de manufatura estudada.

4.4 Análise

Passo 3.1: Definição dos Experimentos

Nesta pesquisa optou-se por desenvolver sete cenários para o primeiro e segundo turnos, considerando as diferentes maneiras de se realizar a entrada de dados no *software* de simulação, conforme apresentado na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Descrição dos Cenários

Cenários		Descrição dos cenários
Primeiro Turno	Segundo Turno	
Cenário 01: Modelo com os tempos de processamento determinísticos coletados pela engenharia.		Considerou-se que os tempos de processamento determinísticos cronometrados pela engenharia da fábrica, coletados independentemente do horário do dia, no primeiro turno, ocorrem durante todo o turno.
Cenário 02: Modelo com os tempos de processamento estocásticos coletados pela engenharia.		Considerou-se que os tempos de processamento estocásticos cronometrados pela engenharia da fábrica, levando-se em conta a média do tempo padrão de 10 amostras, seu desvio padrão e a distribuição, coletados independentemente do horário do dia, no primeiro turno, ocorrem durante todo o turno.
Cenário 03: Modelo com os tempos de processamento coletados no primeiro período.	Cenário 03: Modelo com os tempos de processamento coletados no primeiro período.	Considerou-se que a distribuição encontrada para o primeiro período ocorre durante todo o turno.
Cenário 04: Modelo com os tempos de processamento coletados no segundo período.	Cenário 04: Modelo com os tempos de processamento coletados no segundo período.	Considerou-se que a distribuição encontrada para o segundo período ocorre durante todo o turno.
Cenário 05: Modelo com os tempos de processamento coletados no terceiro período.	Cenário 05: Modelo com os tempos de processamento coletados no terceiro período.	Considerou-se que a distribuição encontrada para o terceiro período ocorre durante todo o turno.
Cenário 06: Modelo com os tempos de processamento coletados no quarto período.	Cenário 06: Modelo com os tempos de processamento coletados no quarto período.	Considerou-se que a distribuição encontrada para o quarto período ocorre durante todo o turno.
Cenário 07: Modelo com os tempos de processamento coletados nos quatro períodos.	Cenário 07: Modelo com os tempos de processamento coletados nos quatro períodos.	<p>Primeiro Turno: Considerou-se a cada período de duas horas, os tempos de processamento coletados nos quatro horários diferentes, segundo as informações abaixo:</p> <p><u>Primeiro Turno:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • 06:00 às 08:00hrs: Nesse período, foram inseridos os tempos de processamento coletados no primeiro horário do primeiro turno. • 08:00 às 10:00hrs: Nesse período, foram inseridos os tempos de processamento coletados no segundo horário do primeiro turno. • 10:00 às 12:00hrs: Nesse período, foram inseridos os tempos de processamento coletados no terceiro horário do primeiro turno. • 12:00 às 15:00hrs: Nesse período, foram inseridos os tempos de processamento coletados no quarto horário do primeiro turno. <p><u>Segundo Turno:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Os mesmos procedimentos realizados no primeiro turno foram realizados no segundo turno.

De acordo com as informações apresentadas na Tabela 4.21, podemos dizer que os cenários 01 e 02 representam os modelos de simulação cujos tempos de processamento foram coletados dentro do Laboratório de Tempos & Métodos, sob condições reais. Já os demais cenários representam os modelos de simulação cujos tempos de processamento foram coletados na linha de montagem, em períodos diferentes durante o turno de trabalho, sob condições reais.

Passo 3.2: Execução dos Experimentos

Inicialmente foram realizadas 30 réplicas durante um dia de trabalho de 8,19 horas para cada um dos 07 cenários nos dois turnos, sendo os dados armazenados para análise.

Passo 3.2.1: Execução dos Experimentos para o Primeiro Turno

O primeiro experimento realizado nesta fase considerou os tempos de processamento determinísticos considerados pela engenharia, o que consideramos nesta pesquisa como o Cenário 01. Neste caso não foi necessário o uso de replicações, uma vez que o tempo inserido é determinístico.

A Tabela 4.22 nos permite concluir que segundo o Cenário 01, a quantidade de peças por turno, prevista por esse modelo é de 184 peças por turno, independente do turno. Portanto, espera-se um total de peças produzidas de 184 peças no primeiro turno e no segundo turno.

Tabela 4.22 - Total produzido pelo Cenário 01

General	Locations	Location States Multi	Location States Single	Resources	Resource States	Failed Arrivals	Entity Activity	Entity S
Modelo Injeção Viva - Experimentos.MOD (Execução Normal - Rep. 1)								
Name	Total Changes	Avg Time Per Change (SEC)	Minimum Value	Maximum Value	Current Value	Avg Value		
TEMPO CICLO	185,00	158,47	154,00	56470,00	157,00	454,95		
PEÇAS HORA	185,00	158,47	0,00	23,00	22,00	21,88		
PEÇAS PRODUZIDAS	184,00	159,26	745,00	929,00	929,00	837,05		
PEÇAS REJEITADAS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
LINHA (obs-based)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
PRODUÇÃO SUB	184,00	159,39	752,00	936,00	936,00	843,89		

O segundo experimento realizado nesta fase considerou os tempos de processamento estocásticos cronometrados pela engenharia, o que consideramos nesta pesquisa como o Cenário 02.

O terceiro experimento realizado nesta fase considerou os tempos de processamento estocásticos cronometrados no primeiro período do turno do dia, o que consideramos nesta pesquisa como o Cenário 03.

O quarto experimento realizado nesta fase considerou os tempos de processamento estocásticos cronometrados no segundo período do primeiro turno, o que consideramos nesta pesquisa como o Cenário 04.

O quinto experimento realizado nesta fase considerou os tempos de processamento estocásticos cronometrados no terceiro período do primeiro turno, o que consideramos nesta pesquisa como o Cenário 05.

O sexto experimento realizado nesta fase considerou os tempos de processamento estocásticos cronometrados no quarto período do primeiro turno, o que consideramos nesta pesquisa como o Cenário 06.

E finalmente, o último experimento realizado nesta fase considerou os tempos de processamento estocásticos cronometrados nos quatro períodos do primeiro turno, o que consideramos nesta pesquisa como o Cenário 07.

Por se tratar de tempos estocásticos, desta vez programou-se o simulador para executar 30 replicações do modelo, gerando aleatoriamente as quantidades de peças produzidas, mas seguindo as distribuições que alimentaram o simulador.

A Tabela 4.23 apresenta um resumo dos resultados obtidos para os Cenários 02, 03, 04, 05, 06 e 07.

Tabela 4.23 - Resultados dos experimentos gerados pelo Promodel[®] – Primeiro Turno

Réplicas	Total produzido (peças)					
	Cenário 02	Cenário 03	Cenário 04	Cenário 05	Cenário 06	Cenário 07
1	185	185	182	184	176	182
2	185	186	182	185	175	183
3	185	185	183	184	174	183
4	184	184	183	185	174	183
5	184	185	182	185	177	182
6	185	185	182	185	175	181
7	184	183	182	183	177	182
8	185	185	183	186	175	183
9	185	185	182	184	174	183
10	184	185	183	183	175	183
11	184	187	182	186	176	182
12	184	185	183	184	176	182
13	183	185	183	185	175	182
14	184	184	183	185	176	184
15	184	187	181	187	176	182
16	184	185	182	184	174	181
17	184	185	182	185	174	183
18	184	184	182	184	176	181
19	184	186	183	185	175	182
20	184	184	182	185	178	183
21	184	186	183	184	176	183
22	184	186	182	184	174	182
23	184	184	182	186	175	184
24	184	184	184	185	175	181
25	184	185	183	184	175	182
26	185	185	183	186	176	182
27	184	184	182	184	176	183
28	184	187	183	185	175	183
29	184	185	183	184	175	182
30	186	183	183	185	176	183

Passo 3.2.2: Execução dos Experimentos para o Segundo Turno

Como os tempos de processamento estocásticos considerados pela Engenharia são iguais para o primeiro e para o segundo turno, não foi necessário realizar esse experimento para o segundo turno, já que os totais produzidos pelo Cenário 02 são independentes do turno de trabalho.

Portanto, o primeiro experimento realizado nesta fase considerou os tempos estocásticos cronometrados no primeiro período do segundo turno, o que consideramos nesta pesquisa como o Cenário 03.

O segundo experimento realizado nesta fase considerou os tempos de processamento estocásticos cronometrados no segundo período do segundo turno, o que consideramos nesta pesquisa como o Cenário 04.

O terceiro experimento realizado nesta fase considerou os tempos de processamento estocásticos cronometrados no terceiro período do segundo turno, o que consideramos nesta pesquisa como o Cenário 05.

O quarto experimento realizado nesta fase considerou os tempos de processamento estocásticos cronometrados no quarto período do segundo turno, o que consideramos nesta pesquisa como o Cenário 06.

E finalmente, o último experimento realizado nesta fase considerou os tempos de processamento estocásticos cronometrados nos quatro períodos do segundo turno, o que consideramos nesta pesquisa como o Cenário 07.

Da mesma forma como explicado no item anterior, por se tratar de tempos de processamento estocásticos, desta vez programou-se o simulador para executar 30 replicações do modelo, gerando aleatoriamente as quantidades de peças produzidas, mas seguindo as distribuições que alimentaram o simulador.

A Tabela 4.24 apresenta um resumo dos resultados obtidos para os Cenários 02, 03, 04, 05, 06 e 07.

Tabela 4.24 - Resultados gerados pelo Promodel® – Segundo Turno

Réplicas	Total produzido (peças)					
	Cenário 02	Cenário 03	Cenário 04	Cenário 05	Cenário 06	Cenário 07
1	185	184	187	184	180	184
2	185	185	183	186	180	187
3	185	182	184	183	178	186
4	184	185	185	184	179	184
5	184	186	185	182	179	188
6	185	186	187	186	177	182
7	184	186	185	185	182	185
8	185	186	187	185	175	184
9	185	185	186	186	181	184
10	184	185	185	183	178	187
11	184	186	185	184	177	185
12	184	183	185	189	181	184
13	183	185	185	186	178	185
14	184	185	185	184	178	184
15	184	185	184	185	178	185
16	184	185	184	184	178	183
17	184	185	184	185	181	186
18	184	184	185	184	176	186
19	184	184	184	187	180	186
20	184	184	186	185	176	186
21	184	183	183	185	175	185
22	184	186	185	187	179	184
23	184	185	187	188	179	185
24	184	185	185	184	177	185
25	184	185	186	188	177	180
26	185	186	186	186	180	184
27	184	186	185	191	178	188
28	184	186	186	186	178	184
29	184	188	187	186	180	184
30	186	187	186	187	180	185

De posse dos resultados dos experimentos acima, o próximo passo foi analisar as diferenças entre os tempos de processamento cronometrados pela Engenharia e os tempos de processamento cronometrados pelo pesquisador na própria linha de montagem. Além disso, foram analisadas as diferenças encontradas entre os resultados gerados pelo Promodel® para os sete cenários abordados nos primeiro e segundo turnos.

Passo 3.3: Análise

Passo 3.3.1: Análise do tempo de processamento

O objetivo desse item foi ilustrar a diferença existente entre o valor médio do tempo de processamento da engenharia e o valor médio das amostras dos tempos de processamento coletados nos quatro períodos diferentes nos primeiro e segundo turnos, conforme apresentado respectivamente na Figura 4.20 e na Figura 4.21.

Pela interpretação da Figura 4.20, podemos concluir que existe diferença entre os tempos de processamento coletados pela Engenharia, através do método atual de Cronoanálise que é realizado no objeto de estudo desta pesquisa, dentro do Laboratório, quando comparados com os tempos de processamento coletados em quatro períodos diferentes durante o primeiro turno, na própria linha de montagem. É possível observar que essa diferença ocorre em todos os postos de trabalho analisados durante os quatro períodos do primeiro turno.

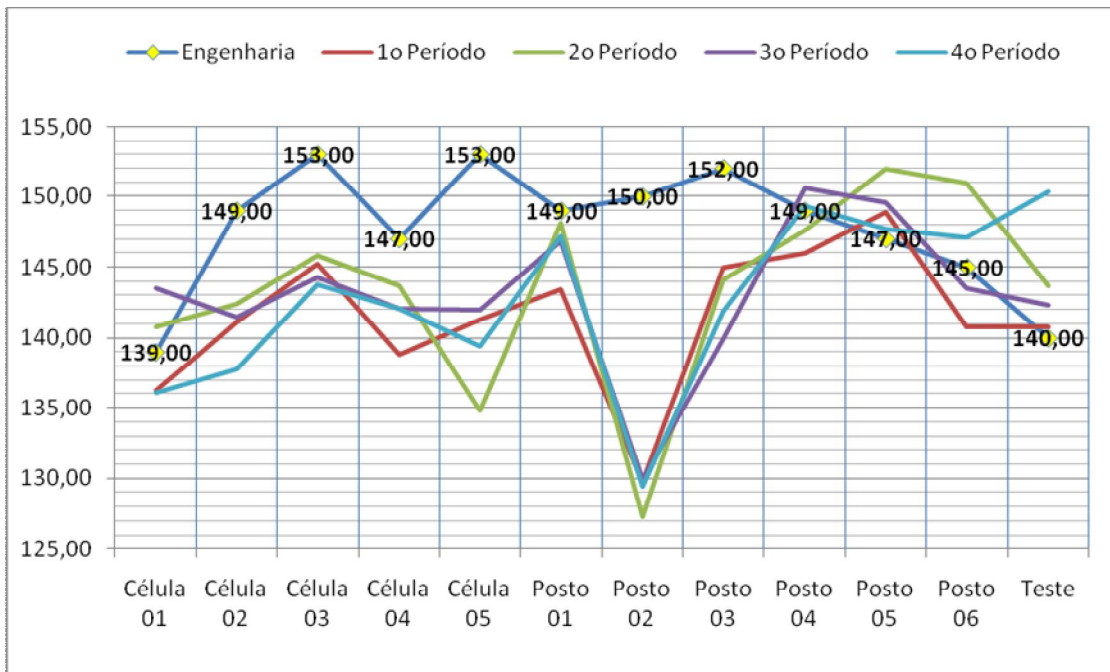


Figura 4.20 - Variabilidade do tempo de processamento – Primeiro Turno

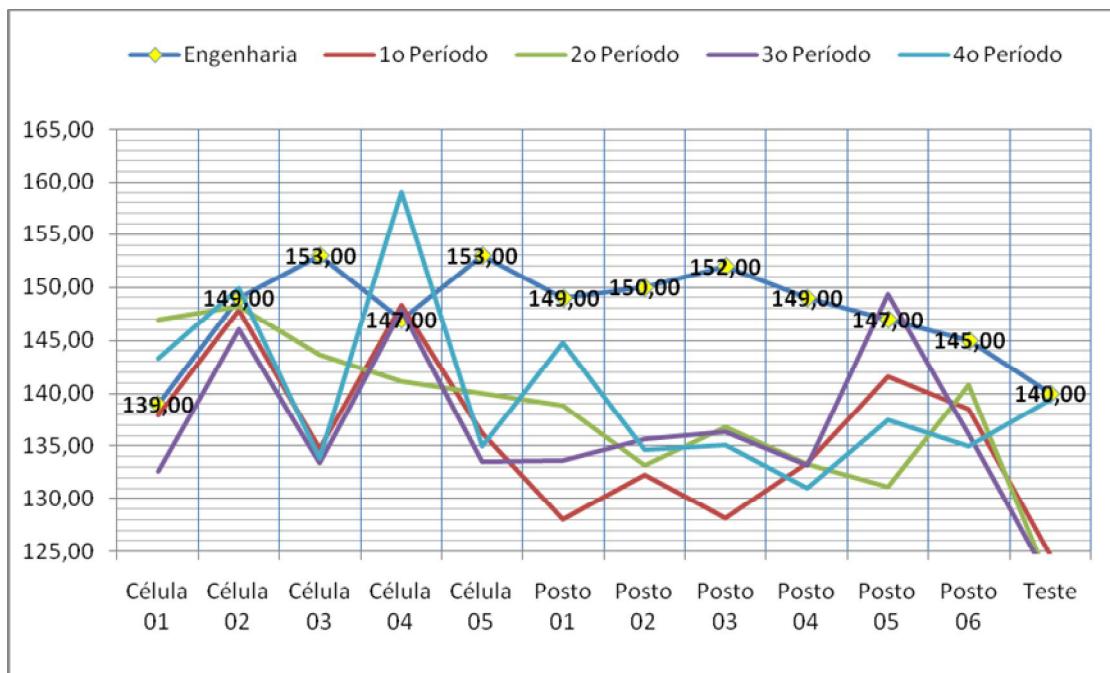


Figura 4.21 - Variabilidade do Tempo de Processamento – Segundo Turno

Pela interpretação da Figura 4.21, podemos concluir que existe uma diferença entre os tempos de processamento coletados pela Engenharia, através do método atual de Cronoanálise que é realizado no objeto de estudo desta pesquisa, dentro do Laboratório, quando comparados com os tempos de processamento coletados em quatro períodos diferentes durante o segundo turno, na própria linha de montagem. É possível observar que essa diferença ocorre em todos os postos de trabalho analisados durante os quatro períodos do segundo turno.

De posse desses dados, optou-se por incluir os dados coletados em diferentes períodos dentro do modelo computacional, a fim de indentificar se a diferença encontrada nos tempos de processamento influencia os resultados previstos pelo modelo da engenharia que utiliza os dados coletados em apenas um período, dentro de um laboratório, conforme descrito anteriormente.

Passo 3.3.2: Análise do total produzido

Passo 3.3.2.1: Primeiro turno

O objetivo desse tópico foi analisar se existe diferença entre os totais produzidos pelo modelo da engenharia e os totais produzidos pelos cenários considerando os tempos de processamento coletados na linha de montagem no primeiro turno.

Primeiramente, compararam-se os resultados gerados pelo Cenário 01 (Modelo da Engenharia com tempos de processamento determinísticos) com os resultados gerados pelo Cenário 02 (Modelo da Engenharia com os tempos de processamento estocásticos), conforme apresentado na Figura 4.22.

Pela interpretação da Figura 4.22, podemos dizer que existe uma diferença entre o valor médio gerado pelo Cenário 01, que é de 184 peças por turno, e os totais produzidos gerados pelo Cenário 02 que são variáveis.

De posse dos dados apresentados na Figura 4.22, optou-se por comparar os totais produzidos pelo Cenário 02, modelo da engenharia que considera tempos de processamento estocásticos, com os totais produzidos pelos Cenários 03, 04, 05, 06 e 07.

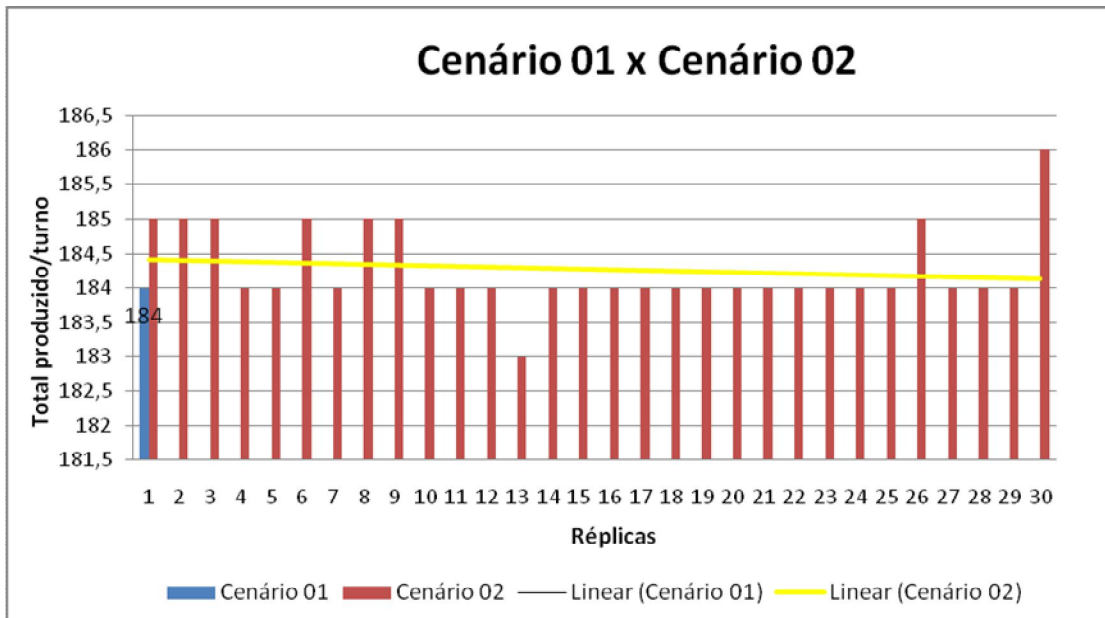


Figura 4.22 – Comparação entre os totais produzidos do Cenário 01 e Cenário 02

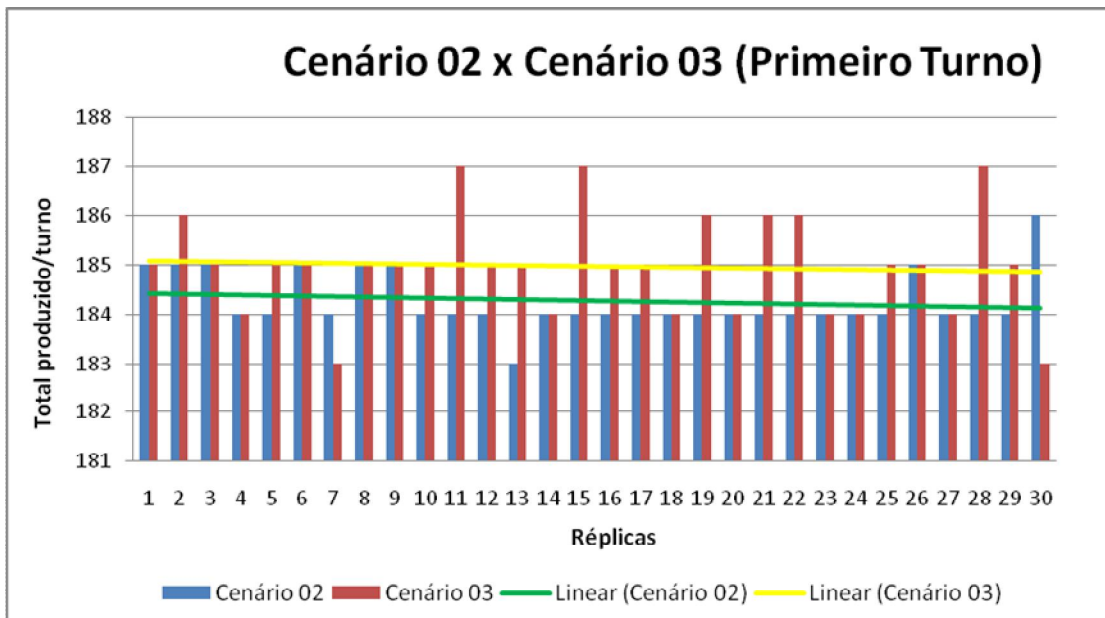


Figura 4.23 – Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 03 do Primeiro Turno

A primeira comparação foi entre o Cenário 02 (que considera os tempos de processamento estocásticos da Engenharia) e o Cenário 03 (que considera que os tempos de processamento coletados no primeiro período do primeiro turno ocorrem durante todo o

primeiro turno). Pela interpretação da Figura 4.23, podemos perceber que existe uma diferença entre os totais produzidos pelos dois cenários, porém será preciso avaliar se essa diferença é significativa ou não.

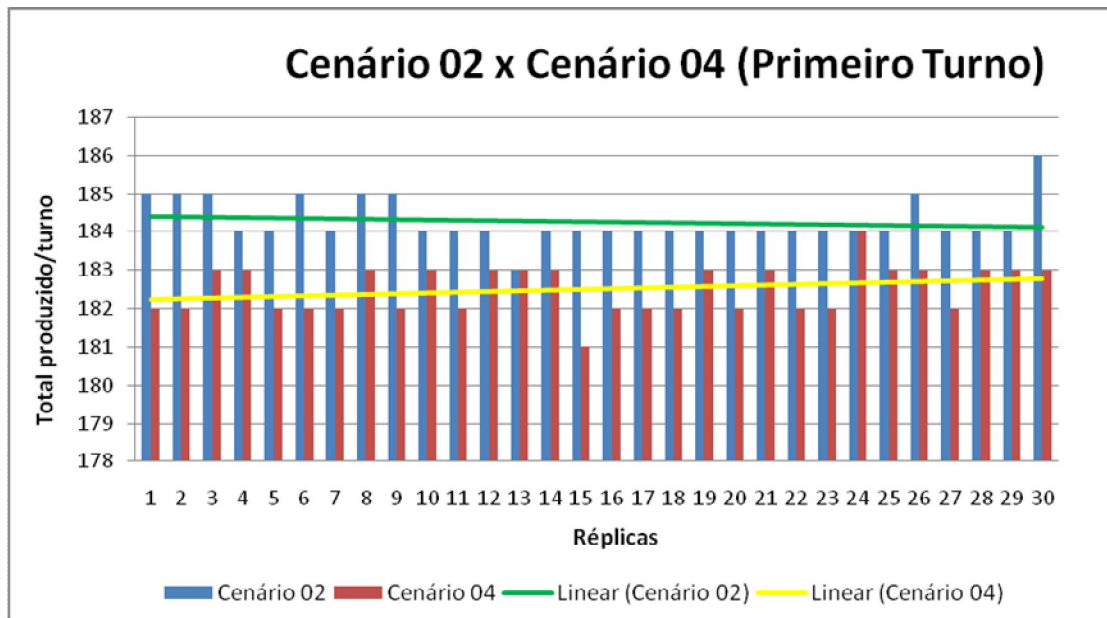


Figura 4.24 – Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 04 do Primeiro Turno

A segunda comparação foi entre o Cenário 02 (que considera os tempos de processamento estocásticos da Engenharia) e o Cenário 04 (que considera que os tempos de processamento coletados no segundo período do primeiro turno ocorrem durante todo o primeiro turno). Pela interpretação da Figura 4.24, foi possível observar que existe uma diferença entre os totais produzidos pelo Cenário 02 e os totais produzidos pelo Cenário 04, porém será preciso avaliar se essa diferença é significativa ou não.

A terceira comparação foi entre o Cenário 02 (que considera os tempos de processamento estocásticos da Engenharia) e o Cenário 05 (que considera que os tempos de processamento coletados no terceiro período do primeiro turno ocorrem durante todo o primeiro turno). Pela interpretação da Figura 4.25, podemos observar que existe uma diferença entre os totais produzidos pelo Cenário 02 e os totais produzidos pelo Cenário 05, porém será preciso avaliar se essa diferença é significativa ou não.

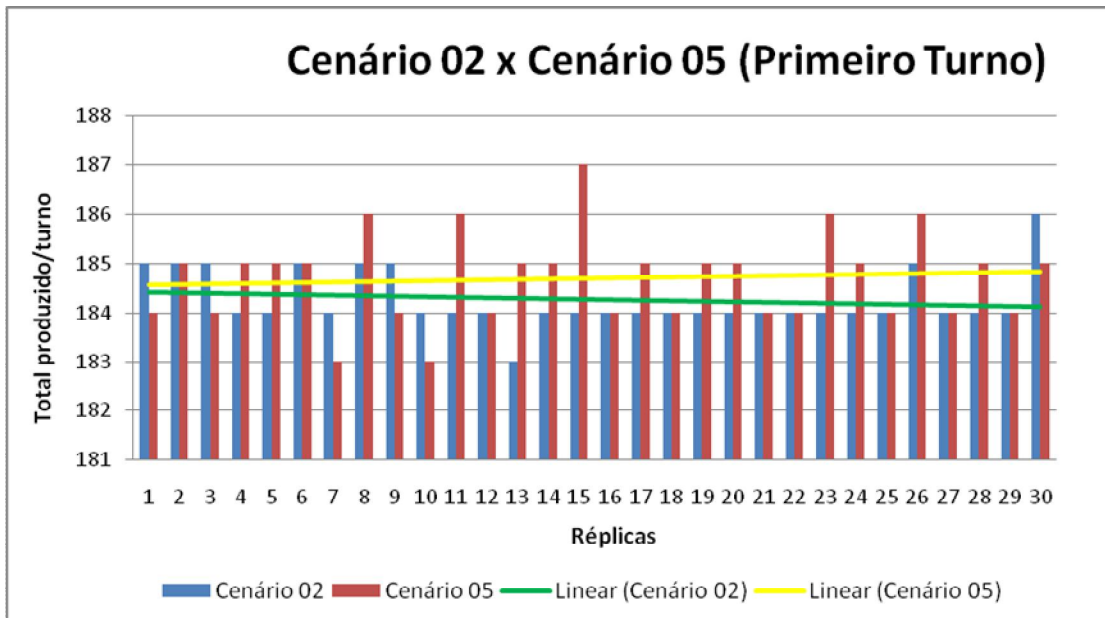


Figura 4.25 – Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 05 do Primeiro Turno

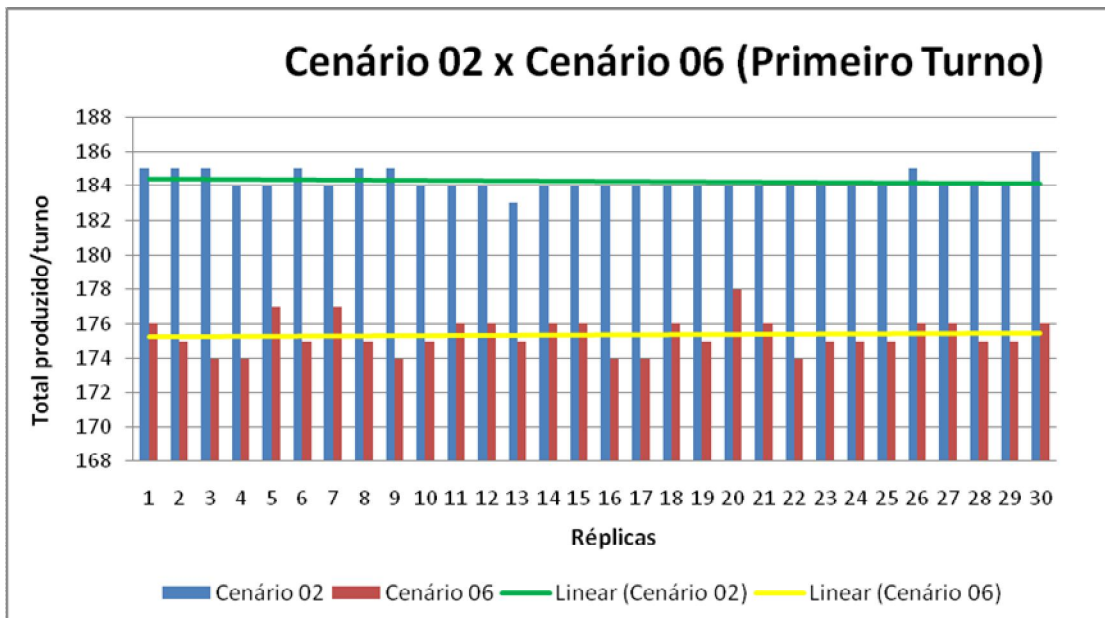


Figura 4.26 – Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 06 do Primeiro Turno

A quarta comparação foi entre o Cenário 02 (que considera os tempos de processamento estocásticos da Engenharia) e o Cenário 06 (que considera que os tempos de processamento coletados no quarto período do primeiro turno ocorrem durante todo o

primeiro turno). Pela interpretação da Figura 4.26, podemos observar que existe uma diferença entre os totais produzidos pelo Cenário 02 e pelo Cenário 06, porém será preciso avaliar se essa diferença é significativa ou não.

A última comparação realizada no primeiro turno foi entre o Cenário 02 (que considera os tempos de processamento estocásticos da Engenharia) e o Cenário 07 (que considera os tempos de processamento coletados nos quatro períodos do primeiro turno). Pela interpretação da Figura 4.27, podemos afirmar que existe uma diferença entre os totais produzidos pelo Cenário 02 e os totais produzidos pelo Cenário 07.

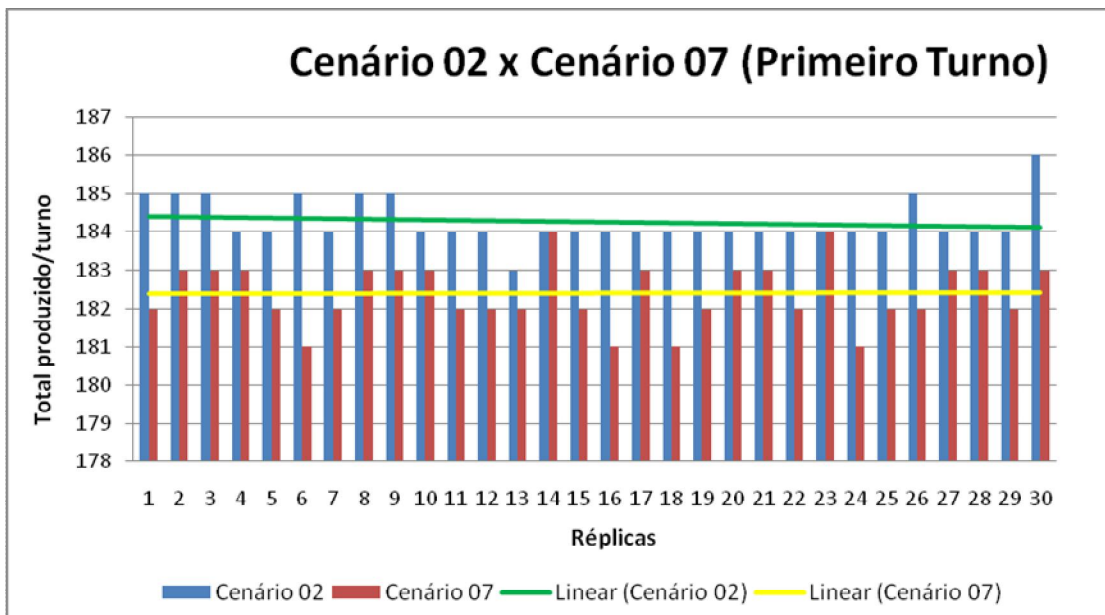


Figura 4.27 – Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 07 do Primeiro Turno

Passo 3.3.2.2: Segundo turno

O objetivo desse tópico foi analisar se existe diferença entre os totais produzidos pelo modelo da engenharia (Cenário 02) e os totais produzidos pelos Cenários 03, 04, 05, 06 e 07 considerando os tempos de processamento coletados na linha de montagem no turno da noite.

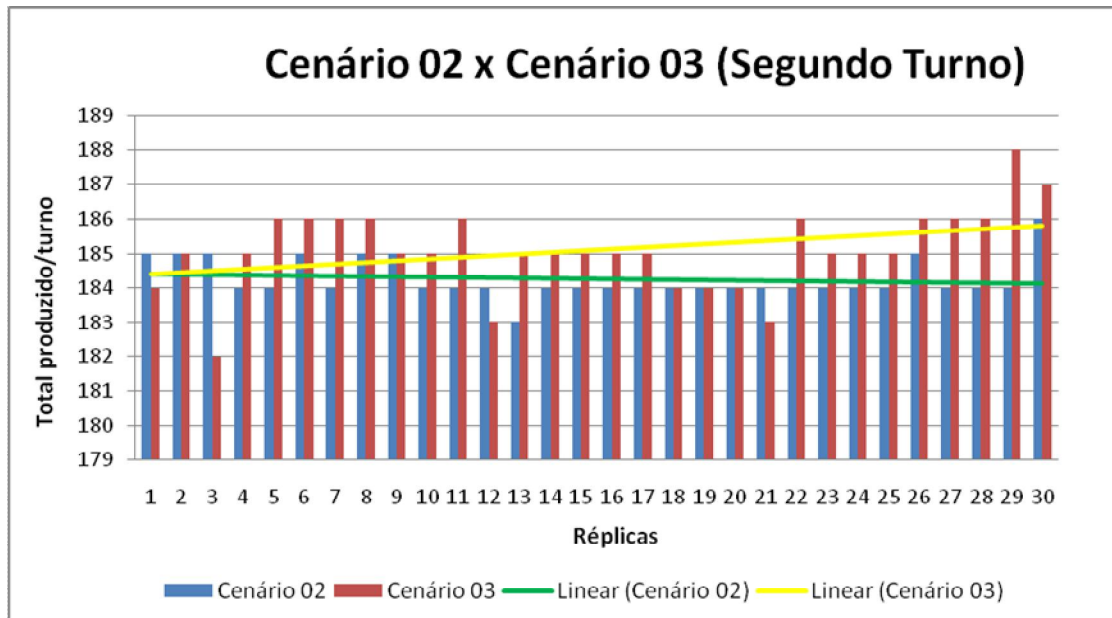


Figura 4.28 – Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 03 do Segundo Turno

A primeira comparação foi entre o Cenário 02 (que considera os tempos de processamento estocásticos da Engenharia) e o Cenário 03 (que considera que os dados coletados no primeiro período do segundo turno ocorrem durante todo o segundo turno). Pela interpretação da Figura 4.28, podemos perceber que existe uma diferença entre os totais produzidos pelos dois cenários.

A segunda comparação foi entre o Cenário 02 (que considera os tempos de processamento estocásticos da Engenharia) e o Cenário 04 (que considera que os dados coletados no segundo período do segundo turno ocorrem durante todo o segundo turno). Pela interpretação da Figura 4.29, podemos perceber que existe uma diferença entre os totais produzidos pelos dois cenários.

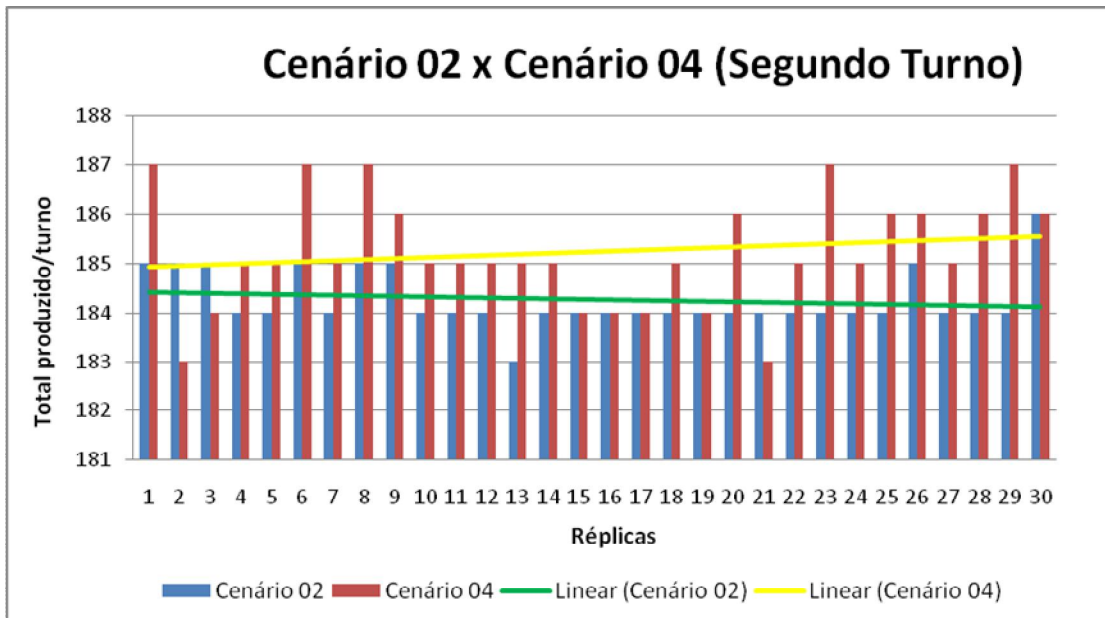


Figura 4.29 – Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 04 do Segundo Turno

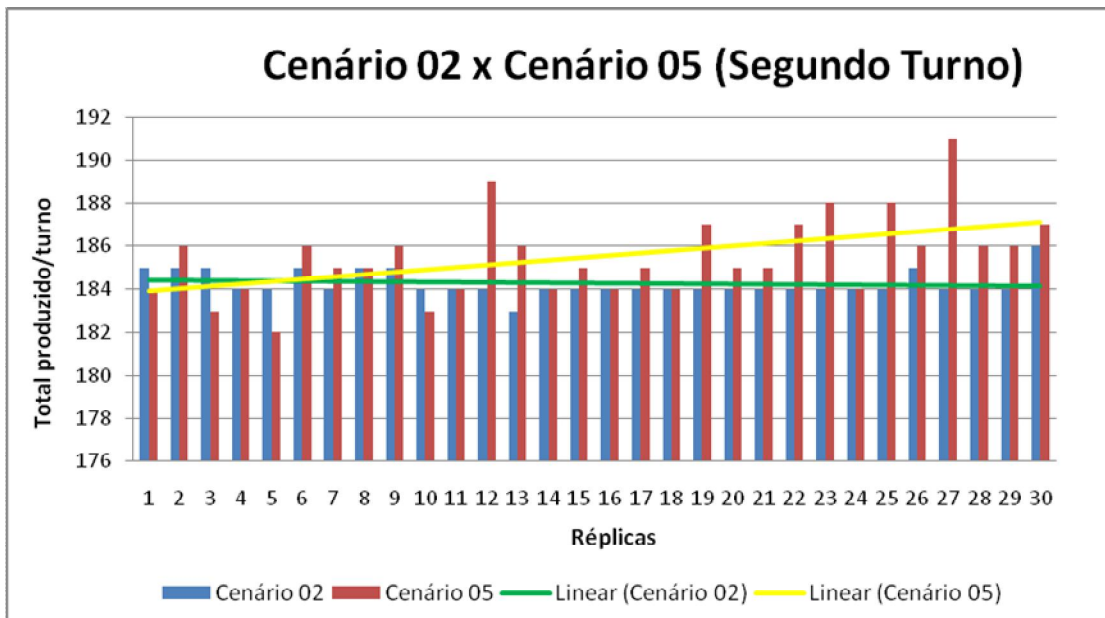


Figura 4.30 – Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 05 do Segundo Turno

A terceira comparação foi entre o Cenário 02 (que considera os tempos de processamento estocásticos da Engenharia) e o Cenário 05 (que considera que os dados coletados no terceiro período do segundo turno ocorrem durante todo o segundo turno). Pela

interpretação da Figura 4.30, podemos perceber que existe uma diferença entre os totais produzidos pelos dois cenários.

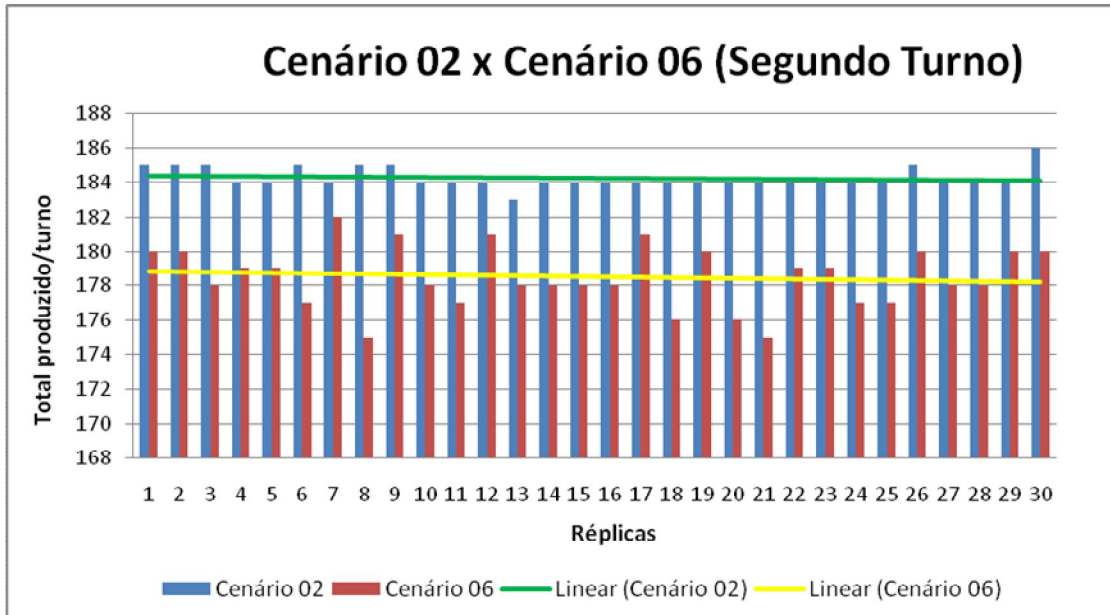


Figura 4.31 – Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 06 do Segundo Turno

A quarta comparação foi entre o Cenário 02 (que considera os tempos de processamento estocásticos da Engenharia) e o Cenário 06 (que considera que os dados coletados no quarto período do segundo turno ocorrem durante todo o segundo turno). Pela interpretação da Figura 4.31, podemos perceber que existe uma diferença entre os totais produzidos pelos dois cenários.

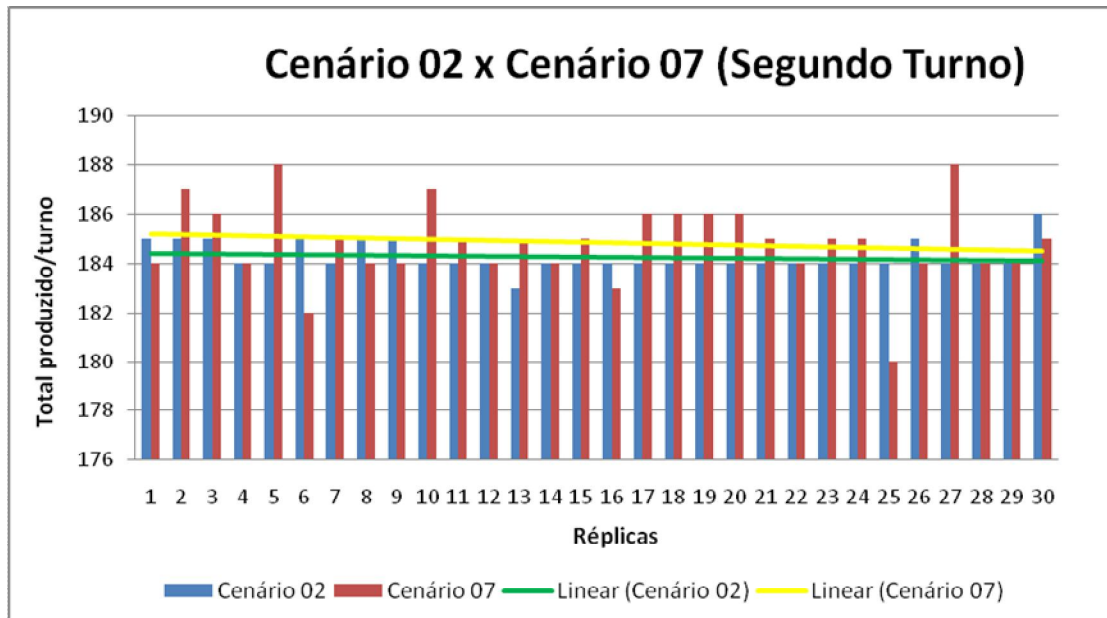


Figura 4.32 – Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e Cenário 07 do Segundo Turno

A última comparação realizada no primeiro turno foi entre o Cenário 02 (que considera os tempos de processamento estocásticos da Engenharia) e o Cenário 07 (que considera os dados coletados nos quatro períodos do segundo turno). Pela interpretação da Figura 4.32, podemos afirmar que existe uma diferença entre os totais produzidos pelo Cenário 02 e os totais produzidos pelo Cenário 07.

Passo 3.3.2.3: Comparação entre turnos

O objetivo desse tópico foi analisar se existe diferença entre o Cenário 02 e os Cenários do Primeiro Turno e os Cenários do Segundo Turno.

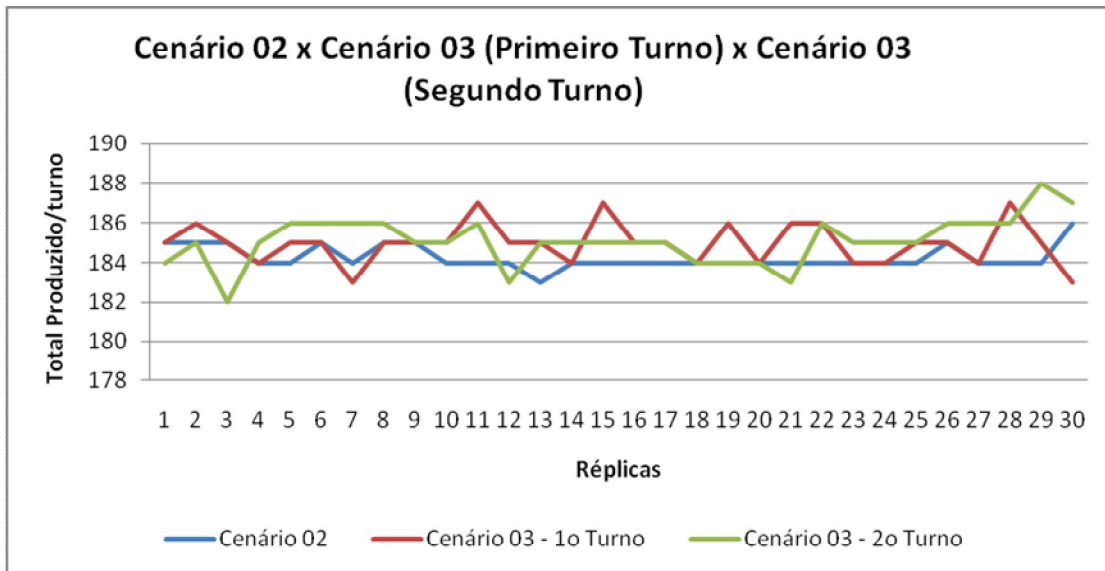


Figura 4.33 – Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e os Cenários 03 dos Primeiro e Segundo Turnos

Pela interpretação da Figura 4.33 foi possível observar que existe diferença entre os totais produzidos gerados pelo Cenário 02, quando comparados aos totais produzidos gerados pelo Cenário 03 do primeiro turno e pelo Cenário 03 do segundo turno.

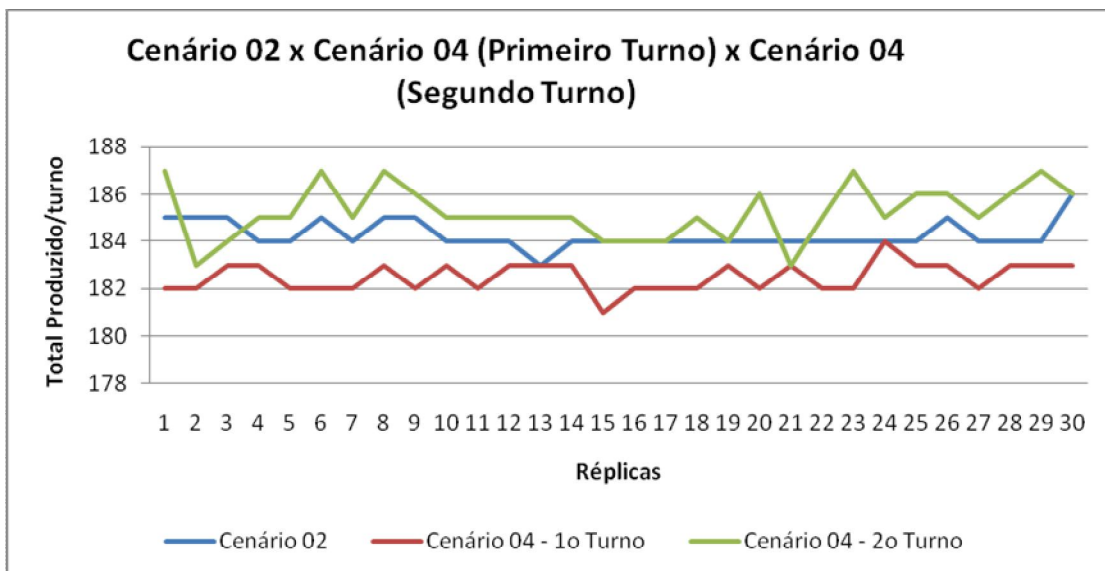


Figura 4.34 – Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e os Cenários 04 dos Primeiro e Segundo Turnos

Pela interpretação da Figura 4.34 foi possível observar que existe diferença entre os totais produzidos gerados pelo Cenário 02, quando comparados aos totais produzidos gerados pelo Cenário 04 do primeiro turno e pelo Cenário 04 do segundo turno.

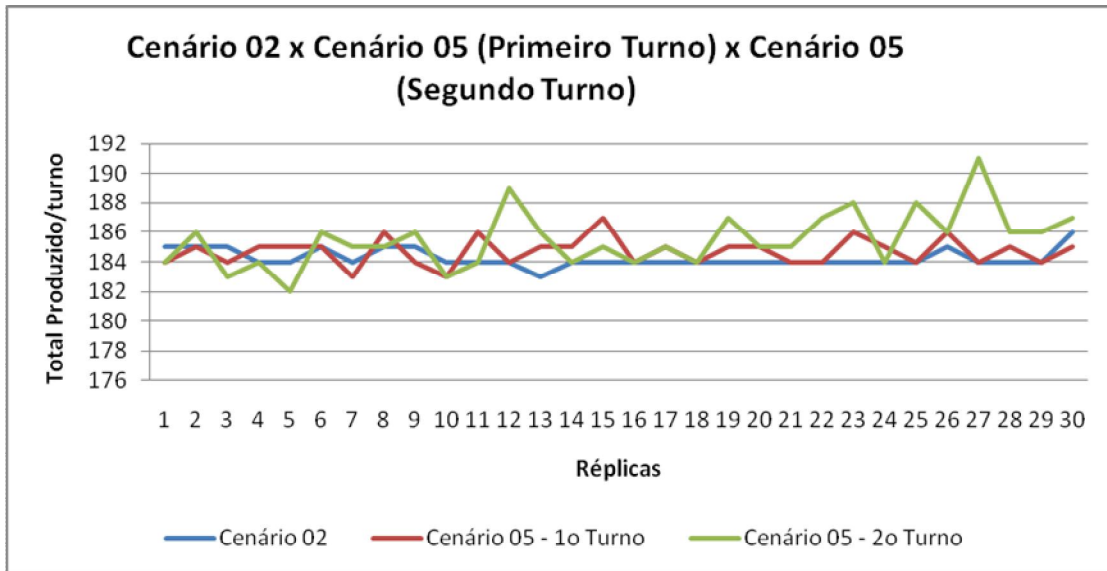


Figura 4.35 – Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e os Cenários 05 dos Primeiro e Segundo Turnos

Pela interpretação da Figura 4.35 foi possível observar que existe diferença entre os totais produzidos gerados pelo Cenário 02, quando comparados aos totais produzidos gerados pelo Cenário 05 do primeiro turno e pelo Cenário 05 do segundo turno.

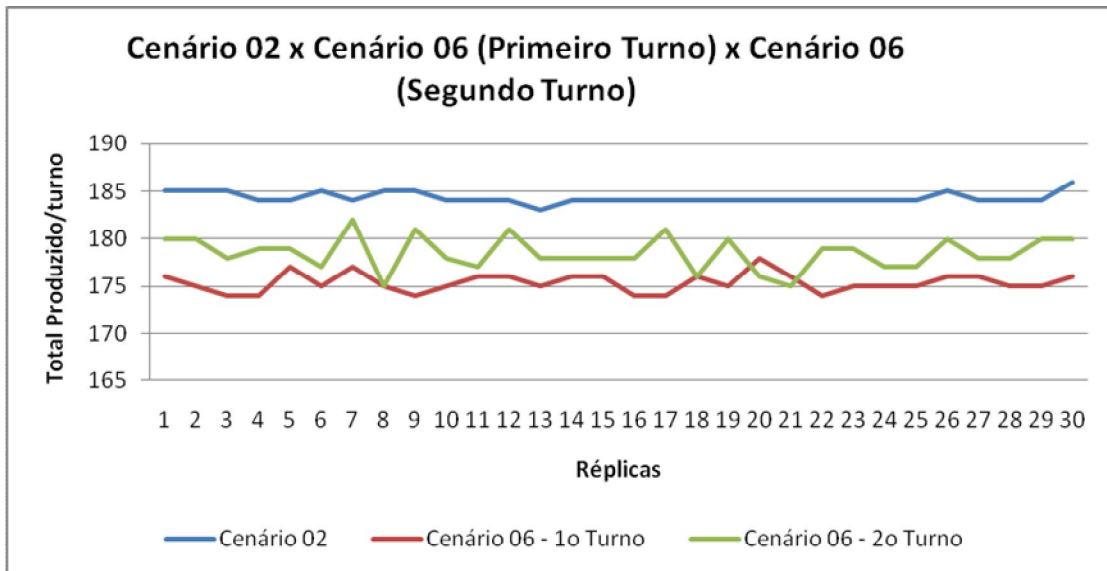


Figura 4.36 – Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e os Cenários 06 dos Primeiro e Segundo Turnos

Pela interpretação da Figura 4.36 foi possível observar que existe diferença entre os totais produzidos gerados pelo Cenário 02, quando comparados aos totais produzidos gerados pelo Cenário 06 do primeiro turno e pelo Cenário 06 do segundo turno.

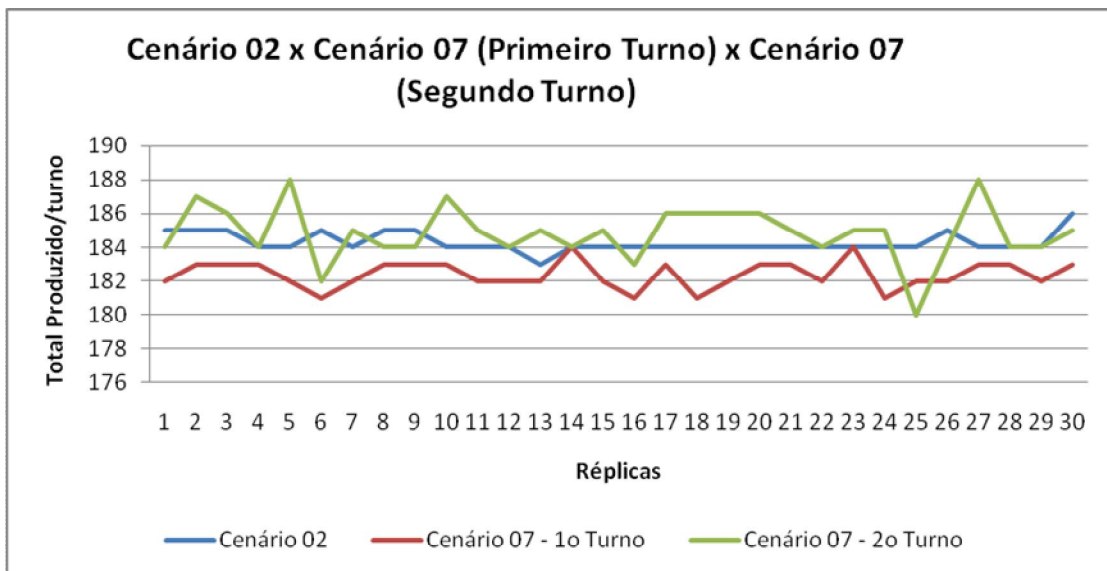


Figura 4.37 – Comparação entre os totais produzidos do Cenário 02 e os Cenários 07 dos Primeiro e Segundo Turnos

Pela interpretação da Figura 4.37 foi possível observar que existe diferença entre os totais produzidos gerados pelo Cenário 02, quando comparados aos totais produzidos gerados pelo Cenário 07 do primeiro turno e pelo Cenário 07 do segundo turno.

Com base nos gráficos apresentados acima, foi possível observar que existe diferença entre os totais produzidos pelo Cenário 02 quando comparados com os totais produzidos pelos demais cenários. Para tanto, optou-se nesta pesquisa por analisar se essas diferenças apresentadas em cada turno são estatisticamente significativas.

Passo 3.3.2.4: Análise Estatística

Para ambos os turnos de trabalho, primeiramente foi realizado um teste estatístico para testar a normalidade dos totais produzidos. A estatística do teste de normalidade (*p-value*) para cada um dos cenários foi menor que o nível de significância adotado (0,05), dessa forma verificou-se que todos os conjuntos de dados não puderam ser aproximados por uma distribuição normal.

O primeiro experimento buscou analisar se existia diferença entre os totais produzidos, considerando os tempos de processamento de engenharia: determinístico e estocástico. O teste *One Sample Sign* foi realizado entre o valor médio do total produzido gerado pelo Cenário 01, considerando os tempos de processamento determinísticos coletados pela engenharia, e os totais produzidos pelo Cenário 02, considerando os tempos de processamento estocásticos considerados pela engenharia. O resultado do teste *One Sample Sign* revelou um *p-value* de 0,00, ou seja, rejeita-se a hipótese de que a produção entre os cenários seja igual. Portanto é possível afirmar que o número de peças produzido pelo Cenário 01 é diferente do número de peças produzidas pelo Cenário 02.

O segundo experimento verificou a existência de diferença entre o total produzido considerando o tempo padrão utilizado pela empresa (Cenário 02) e o total produzido considerando os tempos de processamento cronometrados na linha de montagem (Cenários 03, 04, 05, 06 e 07). Neste caso, foi realizado o teste *Mann Whitney*, para avaliar a igualdade entre as medianas de amostras não normais, como mostra a Tabela 4.25 e 4.26, respectivamente, para o primeiro e segundo turno.

Comparando-se o Cenário 02 com os Cenários 03, 04, 05, 06 e 07 do primeiro turno, o teste *Mann Whitney* revelou um *p-value* menor que 0,05 para todos os casos, ou seja, rejeita-

se a hipótese de que as amostras sejam iguais. Portanto é possível afirmar que o número de peças produzido pelo Cenário 02 é diferente do número de peças produzidas nos cinco cenários considerados. Pela interpretação dos resultados, podemos concluir que a produção obtida a partir dos dados coletados dentro de um laboratório é diferente da produção realmente obtida na linha de montagem.

Tabela 4.25 - Resultados dos Testes de Hipóteses do Primeiro Turno

Teste de Hipótese		<i>P-Value</i>
<i>Mann-Whitney / One Sample Sign</i>		Total Produzido
Cenário 01	Cenário 02	0,00
Cenário 02	Cenário 03	0,00
Cenário 02	Cenário 04	0,00
Cenário 02	Cenário 05	0,03
Cenário 02	Cenário 06	0,00
Cenário 02	Cenário 07	0,00

Terminada essa etapa, partiu-se para a comparação entre os cenários do segundo turno. Nessa etapa não foi preciso analisar a diferença entre o número de peças produzido no Cenário 01 e o número de peças produzido no Cenário 02 para o segundo turno, uma vez que ambos os cenários geram um total produzido estatisticamente igual ao total produzido nos cenários 01 e 02 no primeiro turno.

Tabela 4.26 – Resultados dos Testes de Hipóteses do Segundo Turno

Teste de Hipótese		<i>P-Value</i>
<i>Mann-Whitney</i>		Total Produzido
Cenário 02	Cenário 03	0,00
Cenário 02	Cenário 04	0,00
Cenário 02	Cenário 05	0,00
Cenário 02	Cenário 06	0,00
Cenário 02	Cenário 07	0,00

As mesmas conclusões retiradas das análises dos dados realizadas anteriormente puderam ser reproduzidas para o segundo turno, ou seja, o número de peças produzido pelo Cenário 02 é diferente do número de peças produzidas nos cinco cenários. Reafirmando a diferença entre os totais produzidos considerando os tempos de processamento coletados dentro de um laboratório e os totais produzidos considerando os tempos de processamento coletados na linha de montagem.

O terceiro experimento analisou se existia diferença significativa entre os totais produzidos considerando os tempos de processamento cronometrados na linha de montagem de acordo com o turno de trabalho. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 4.27.

Tabela 4.27 - Resultados do Teste de Hipótese do Primeiro e Segundo Turnos

Teste de Hipótese		P-Value Total Produzido
Mann Whitney		
Cenário 03 - 1º Turno	Cenário 03 - 2º Turno	0,44
Cenário 04 - 1º Turno	Cenário 04 - 2º Turno	0,00
Cenário 05 - 1º Turno	Cenário 05 - 2º Turno	0,07
Cenário 06 - 1º Turno	Cenário 06 - 2º Turno	0,00
Cenário 07 - 1º Turno	Cenário 07 - 2º Turno	0,00

Comparando-se o Cenário 03 do primeiro turno com o Cenário 03 do segundo turno, o teste *Mann Whitney* revelou um *p-value* de 0,44, ou seja, se aceita a hipótese de que as amostras sejam iguais. Portanto é possível afirmar que o número de peças produzido no primeiro período do primeiro turno é igual ao número de peças produzido no primeiro período do segundo turno. Esse fato pode ser explicado pelo fato dos tempos de processamento utilizados para o Cenário 03 serem referentes ao primeiro período de cada turno, ou seja, o operador está iniciando o seu turno de trabalho, em boas condições, livre dos sintomas de fadiga, fome, e por isso, provavelmente apresenta um mesmo desempenho no início de cada turno.

Comparando-se o Cenário 04 do primeiro turno com o Cenário 04 do segundo turno, o teste *Mann Whitney* revelou um *p-value* de 0,00, ou seja, rejeita-se a hipótese de que as amostras sejam iguais. Portanto é possível afirmar que o número de peças produzido no

segundo período do primeiro turno é diferente do número de peças produzido no segundo período do segundo turno. Como os tempos de processamento considerados no Cenário 04 são referentes ao segundo período de cada turno, provavelmente o desempenho do operador possa estar sofrendo influências por já estar trabalhando há duas horas, por estar se aproximando do horário do almoço ou do jantar, etc.

Comparando-se o Cenário 05 do primeiro turno com o Cenário 05 do segundo turno, o teste *Mann Whitney* revelou um *p-value* de 0,07, ou seja, se aceita a hipótese de que as amostras sejam iguais. Portanto é possível afirmar que o número de peças produzido no terceiro período do primeiro turno é igual ao número de peças produzido no terceiro período do segundo turno. Nesse caso, a igualdade entre os Cenários 05 do primeiro e segundo turnos, pode ser explicada pelo fato dos tempos de processamento desse cenário ter sido cronometrado logo após o almoço, momento em que o operador está reiniciando o seu trabalho.

Comparando-se o Cenário 06 do primeiro turno com o Cenário 06 do segundo turno, o teste *Mann Whitney* revelou um *p-value* de 0,00, ou seja, rejeita-se a hipótese de que as amostras sejam iguais. Portanto é possível afirmar que o número de peças produzido no quarto período do primeiro turno é diferente do número de peças produzido no quarto período do segundo turno. Nesse caso, a diferença entre os totais produzidos pelos dois turnos, pode ser explicada pelo fato dos tempos de processamento ter sido cronometrado no último período do turno, momento em que o operador está sendo influenciado por um acúmulo de fadiga, monotonia e pelas variações relacionadas ao biorritmo.

E finalmente, comparando-se o Cenário 07 do primeiro turno com o Cenário 07 do segundo turno, o teste *Mann Whitney* revelou um *p-value* de 0,00, ou seja, rejeita-se a hipótese de que as amostras sejam iguais. Portanto é possível afirmar que o número de peças produzido durante o primeiro turno é diferente do número de peças produzido no segundo turno.

De posse dos resultados dos testes de hipóteses foi possível concluir que existe uma diferença significativa entre os tempos de processamento coletados pela engenharia (condições padrões em um laboratório) e os tempos de processamento coletados na linha de montagem e conseqüentemente a diferença entre os totais produzidos também é significativa.

Por fim, com o objetivo de avaliar a diferença entre os totais produzidos por período do dia e a diferença entre os totais produzidos por turno, foi realizado o *Mood Median Test*, para testar a igualdade das medianas das amostras não normais, conforme apresentado na Figura 4.38.

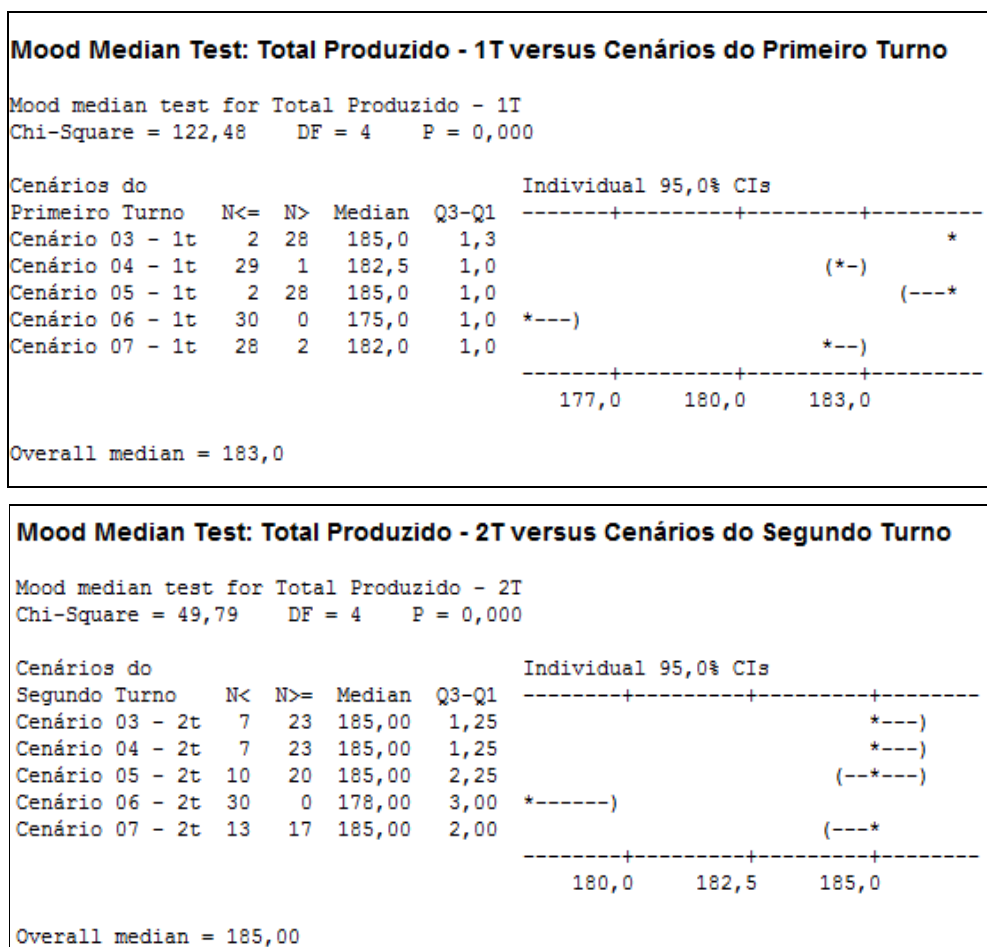


Figura 4.38 – Resultados do *Mood Median Test* gerados pelo Minitab

Como pode ser observado, o teste apresentou *p-value* abaixo do nível de significância adotado (0,05). Portanto, existe evidência suficiente para rejeitarmos a hipótese nula de que as medianas das amostras são iguais, e podemos afirmar que existe diferença significativa entre os totais produzidos de acordo com o período para os dois turnos analisados.

O gráfico apresentado na Figura 4.39 ilustra os resultados encontrados no *Mood Median Test* para os dois turnos.

Pela interpretação dos resultados do gráfico apresentado na Figura 4.39, foi possível verificar que a diferença entre os totais produzidos no primeiro turno é maior que a diferença entre os totais produzidos no segundo turno.

No primeiro turno, o número de peças produzidas nos cenários 03 e 05 são iguais, porém, o número de peças produzidas nos cenários 04 e 06 são diferentes. Nesse caso, foi possível perceber que a maior variabilidade ocorreu no cenário 06, o que pode ser explicado pelo acúmulo de fadiga, monotonia e variações relacionadas ao ritmo circadiano.

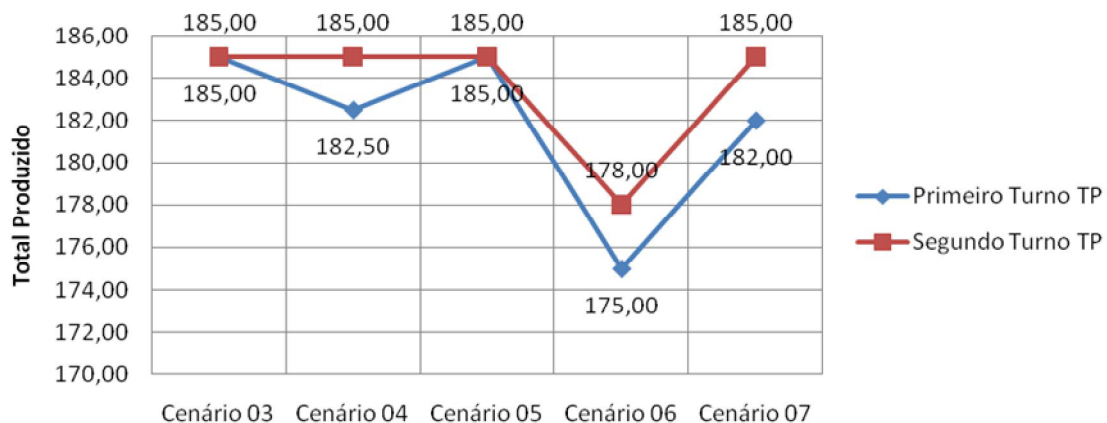


Figura 4.39 – Resultados do *Mood Median Test* em forma de gráfico

Já no segundo turno, observou-se que não existe diferença entre os totais produzidos pelos cenários 03, 04 e 05. Porém, o número de peças produzidas pelo cenário 06 é diferente do número de peças produzidas nos demais cenários. Da mesma maneira como ocorreu no primeiro turno, foi possível perceber que a maior variabilidade ocorreu no cenário 06, o que pode ser explicado pelo acúmulo de fadiga, monotonia e variações relacionadas ao biorritmo. Além disso, o cenário 06 do segundo turno é caracterizado pelas duas últimas horas do dia de trabalho, período quando o corpo humano está se preparando para o sono, caracterizado pela redução da temperatura corporal e aumento da produção da melatonina (hormônio do sono).

Comparando-se o cenário 07 do primeiro turno com o cenário 07 do segundo turno, foi possível perceber que embora a diferença entre os períodos do segundo turno seja menor, quando os quatro períodos foram considerados no mesmo modelo, a diferença encontrada entre os turnos foi significativa.

4.5 Considerações finais

Pela interpretação dos resultados apresentados no item anterior, inicialmente foi possível concluir que existe diferença entre os tempos de processamento coletados pela engenharia, dentro do laboratório, sob condições ideais, quando comparados com os tempos de processamento coletados pelo pesquisador, em períodos diferentes durante os turnos de trabalho, na própria linha de montagem, sob condições reais.

Posteriormente, optou-se por inserir os tempos de processamento no modelo computacional, com o objetivo de avaliar se existe diferença entre o total produzido considerando os tempos de processamento coletados pela engenharia quando comparado com o total produzido considerando os tempos coletados pelo pesquisador em diferentes períodos do turno na própria linha de montagem. Pela interpretação dos gráficos, verificou-se que dependendo do horário e do turno, assim como das condições em que esses dados são coletados, isso provocará alterações nos resultados gerados pelo modelo.

Assim, foi possível observar que o sistema de produção estudado apresenta uma produção sazonal em função das alterações que ocorrem no desempenho humano devida ao ritmo circadiano e à mudança dos turnos de trabalho.

A partir de então, optou-se por fazer uma análise estatística, através dos testes de hipóteses para verificar se a diferença encontrada entre os totais produzidos é significativa ou não.

O resultado do primeiro teste de hipótese nos permitiu concluir que existe diferença entre os totais produzidos considerando o tempo da engenharia e os totais produzidos considerando os tempos de processamento cronometrados na linha de montagem, ou seja, dentro de um laboratório, sob condições ideais, o número de peças produzidas é diferente do número de peças produzidas em períodos diferentes em uma linha de montagem, sob condições reais.

O segundo teste de hipótese nos permitiu analisar se existe diferença entre os totais produzidos considerando os tempos de processamento cronometrados na linha de montagem de acordo com o turno trabalhado. A partir deste teste foi possível concluir não existe diferença entre os totais produzidos pelos cenários 03 do primeiro e do segundo turno. Isso pode ser explicado pelo fato de que os tempos de processamento dos cenários 03 foram

coletados no início de cada turno, momento em que o operador encontra-se livre dos sintomas da fadiga, fome, alteração do biorritmo. Além disso, foi possível concluir que também não existe diferença entre os totais produzidos pelos cenários 05 do primeiro e do segundo turno, o que pode ser explicado pelo fato de que os tempos de processamento dos cenários 05 foram coletados após o almoço e/ou jantar, momento em que o operador está reiniciando o turno, possivelmente mais descansado, sem fome, com mais disposição. Já em relação aos demais cenários comparados, tais como os cenários 02, 04, 06 e 07, observou-se que existe uma diferença estatística entre os totais produzidos quando comparados os dois turnos.

O terceiro teste de hipótese nos permitiu concluir que existe diferença entre os totais produzidos considerando diferentes períodos do turno e que também existe diferença entre os totais produzidos considerando diferentes turnos de trabalho. Pela interpretação dos resultados foi possível observar que a diferença encontrada nos períodos do dia é maior que a diferença encontrada nos períodos da noite, o final de cada turno é menos produtivo comparado ao início do turno e que o turno da noite é mais produtivo do que o turno do dia.

O próximo capítulo finaliza esta pesquisa, com a apresentação das conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

5. CONCLUSÕES

5.1 Conclusões e contribuições da pesquisa

Este capítulo finaliza a pesquisa desenvolvida nesta dissertação, apresentando as conclusões dos objetivos propostos. Finalizando, são apresentadas algumas recomendações para trabalhos futuros. No Anexo A, são citados os artigos gerados a partir desta dissertação.

O primeiro objetivo desta pesquisa foi identificar como inserir fatores humanos em um modelo de simulação a eventos discretos. Para tanto, isso foi possível através da cronoanálise realizada na própria linha de montagem, considerando os diferentes tempos de processamento coletados nos períodos analisados no decorrer de cada turno assim como sua respectiva produção nesses períodos.

O segundo objetivo desta pesquisa foi avaliar se a incorporação de fatores humanos, especificamente o ritmo circadiano e o trabalho em turnos, em um modelo de simulação alteram os resultados previstos pelo modelo de simulação sem a incorporação desses fatores. Desta forma, realizou-se a modelagem de um processo industrial com elevada proporção de trabalho manual e os resultados de produção no decorrer dos turnos foram comparados.

O efeito do ritmo circadiano e do trabalho em turnos foi avaliado através da comparação do total produzido pelo posto de trabalho de acordo com o período e com o turno em que os tempos de processamentos foram coletados. Para isso, foram elaborados sete cenários considerando-se os períodos e os turnos em que os dados foram coletados.

A partir daí foi possível verificar que existe diferença entre o total produzido considerando o tempo padrão da engenharia cronometrado em condições de trabalho ideais em um laboratório e o total produzido considerando os tempos de processamento cronometrados na linha de montagem em condições reais de operação. Pode-se constatar também que os tempos operacionais estocásticos representam melhor o trabalho humano, já que consideram as variações naturais que ocorrem durante o trabalho.

Foi possível constatar a queda do desempenho dos operadores ao final de cada turno pela redução da produtividade quando comparada à produtividade do início do turno, e isso pode ser explicado pelo acúmulo de fadiga, monotonia e variações relacionadas ao ritmo circadiano.

Verificou-se uma menor variação da produtividade ao longo dos períodos do segundo turno. Além disso, pode-se constatar que o segundo turno é mais produtivo que o primeiro turno. Tal fato possui relação direta com a menor supervisão existente nesse turno, o que faz com que os operadores se concentrem mais e produzam um maior número de peças.

Sem a realização da cronoanálise nos quatro períodos por turno, seria utilizado o tempo padrão da engenharia no modelo de simulação, o que conduziria a resultados menos precisos quando comparados com os resultados reais. Isso reforça a contribuição dessa proposta de cronoanálise para a empresa, visto que confere maior credibilidade aos modelos de simulação, ao propor que o modelo de simulação utilize a cada período um tempo de processamento diferente de acordo com o período do dia, gerando taxas de produção variáveis com o passar do tempo. Assim, a empresa terá dados mais confiáveis no que se refere à taxa de produção real de um operador.

Na presente pesquisa, foi comprovado que a influência do ritmo circadiano e do trabalho em turnos gera diferenças significativas nas variáveis de saída do modelo, como no caso do total produzido. Assim, fica evidenciada a importância de se considerar fatores humanos em modelos de simulação, com o intuito de aumentar sua qualidade.

Desta forma pode-se considerar a inclusão de fatores humanos em modelos de simulação como um desafio ainda a ser superado. Apesar das pesquisas existentes há muito ainda por se fazer. Uma das grandes limitações continua sendo a dificuldade de mensurar fatores humanos, tais como: características psicológicas e emocionais, assim como a relação de interdependência entre os fatores humanos, para sua posterior inclusão em modelos de simulação. Além disso, ressalta-se que a coleta de dados em empresas altamente dependentes de mão-de-obra é uma tarefa altamente difícil de ser realizada. Tem-se ainda que um modelo de desempenho humano, advindo de uma realidade, pode não ser aplicável em outro contexto, mesmo que próximo àquele de origem.

Para tanto, os engenheiros que atualmente desconhecem os comportamentos sociais, psicológicos e fisiológicos dos operadores com os quais eles interagem, precisam examinar o trabalho dessas ciências sociais, com o intuito de incorporar os fatores que alteram o desempenho humano nos pacotes de simulação, melhorando assim a precisão desses modelos.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Optou-se aqui por analisar a influência de dois fatores humanos, porém, existem outros fatores tais como o tipo de tarefa, capacidade, formação, idade, sexo, aprendizagem, educação, ambientes físicos e organizacionais, características psicológicas e fisiológicas que poderiam ser considerados nos modelos de simulação em pesquisas futuras.

Porém, no contexto industrial, a medição do comportamento do operador é muitas vezes difícil de ser realizada, especialmente devido às restrições legais. Sugere-se que em pesquisas futuras a coleta de dados seja realizada de forma automática, uma vez que isso possibilitaria a obtenção de um maior número de dados. Vale ressaltar que a coleta de dados nesse tipo de trabalho requer tempo e esforço excepcional.

Sugere-se que em pesquisas futuras, seja estimado o erro de previsão dos modelos de simulação que não consideram os fatores humanos e o erro de previsão dos modelos de simulação que consideram os fatores humanos. Uma sugestão para realizar essa comparação seria registrar os dados de produção em períodos e turnos diferentes que se pretenda analisar, uma vez que esses dados viabilizarão a identificação de qual modelo de simulação se aproxima mais do real.

Além disso, sugere-se que em uma próxima pesquisa, sejam analisados dados empíricos relacionados ao sistema para identificar os fatores determinantes de variação do desempenho do operador, uma vez que essa consideração tornará o estudo mais preciso. Um possível cenário seria analisar a influência dos seguintes fatores: diferença entre tarefas, diferença entre equipes de trabalho, sexo, idade e aprendizagem.

Finalmente, sugere-se que os novos pacotes de simulação incorporem na programação de seus softwares uma opção que permita considerar uma taxa de variação do desempenho do operador ao longo do dia, devida a alterações do ritmo circadiano, fadiga, fome, aspectos psicológicos, qualificação, características físicas, capacidade de aprendizado, resposta a condições adversas de trabalho, dentre outros fatores que influenciam o desempenho deste no sistema real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAINES, T. S. Modelling in the evaluation of a manufacturing strategy. PhD thesis, Cranfield University, UK, 1994.

BAINES, T. S.; BENEDITTINI, O. Modelling human performance within manufacturing systems design: from a theoretical towards a practical framework. *Journal of Simulation*, n.1, pp 121-130, 2007.

BAINES, T. S.; KAY, J. M. Human performance modelling as an aid in the process of manufacturing system design: a pilot study. *Int. J. Prod. Res.* 40 (10), pp.2321–2334, 2002.

BAINES, T. S.; ASCH, R.; HADFIELD, L.; MASON, J. P; FLETCHER, S.; KAY, J. M. Towards a theoretical framework for human performance modeling within manufacturing systems design. *Simulation Modelling Practice and Theory*, n. 13, pp.486–504, 2005.

BAINES, T. S.; MASON, S.; SIEBERS, P. O; LADBROOK, J. Humans: the missing link in manufacturing simulation? *Simulation Modelling Practice and Theory*, n.12, pp.515–526, 2004.

BALCI, O.; SARGENT, R. G. Some examples of simulation model validation using hypothesis testing. In: *WINTER SIMULATION CONFERENCE, Proceedings...* San Diego, CA, USA, 1982.

BANKS, J. Introduction to simulation. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*. Atlanta, 2000.

BANKS, J.; CARSON, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. Discrete event system simulation. 4.ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2005.

BANKS, J. Principles of simulation. In: BANKS, J. (Ed.) *Handbook of Simulation*. New York: John Wiley & Sons. cap. 1, pp. 3-30. ISBN 0-471-13403-1, 1998.

BEERSMA, D.G.; GORDIJN, M.C. Circadian control of the sleep-wake cycle, *Physiology Behavior*, 90 (2007), 190-195.

BELGE, Simulação. [on line <http://www.belge.com.br/cases_outros_justificando.html>; capturado em <22/06/08>].

BERGER, A.M.; HOBBS, B.B. Impact of shift work on the health and safety of nurses and patients, *Clinical Journal of Oncology Nursing*, 10 (2006) 465-71.

BERNHARDT, W.; SCHILLING, A. Simulation of group work processes in manufacturing. In: *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, Atlanta, Georgia, pp. 888–891, 1997.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Modelling and Simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, v.22, n.2, pp.241-264, 2002.

BIGGI, N.; CONSONNI, D.; GALUZZO, V.; SOGLIANI, M.; COSTA, G. Metabolic syndrome in permanent night workers, *Chronobiology International*, 25 (2008) 443-54.

BLANCHARD, B. S. System engineering management. New York: John Wiley & Sons. pp. 416, ISBN 0471506761, 1991.

BONNEY, M.; HEAD, M.; RATCHEV, S.; MOUALEK, I. A manufacturing system design framework for computer aided industrial engineering. *Int. J. Prod. Res.* 38 (17), pp. 4317–4327, 2000.

BRUZZONE, A.G.; BRIANO, E.; BOCCA, E.; MASSEI, M., Evaluation of the impact of different human factor models on industrial and business processes, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15 (2007) 199–218.

Referências Bibliográficas

- BUNTING, A.J.; BELYAVIN, A.J. Modelling Human Performance in Semi-Automated Systems in People in control-international conference on human interfaces in control rooms, cockpits and command centres. pp. 21–25, (IEE CP), 1999.
- CARRIE, A. Simulation of manufacturing systems. 1st ed. New York: John Wiley & Sons, 1988.
- CARSON, J. Introduction to modeling and simulation. Winter Simulation Conference, 2004.
- CARVALHO, I.C.G. Trabalho em turnos de operários metalúrgicos e a dinâmica familiar. Dissertação (Mestrado em Psicologia Social) Instituto de Psicologia, Universidade de São Paulo, 1990.
- CHECKLAND, P. B. Systems Thinking, Systems Practice. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1981.
- CHUN, H.W. Automatic Simulation Program Synthesis Using a Knowledge-Base Approach. Simulation Practice and Theory, 5, pp. 473-488, 1997.
- CHUNG, C.A. Simulation Modeling Handbook: a practical approach. Washington D.C: CRC press, 2004.
- CHWIF, L.; MEDINA, A.C. Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações. 2.ed. São Paulo: Ed. dos autores, 2007.
- CHWIF, L.; PAUL, R. J.; BARRETTO, M.R.P. Discrete event simulation model reduction: A causal approach. Simulation Modelling Practice and Theory, n.14, pp. 930–944, 2006.
- CONWAY, P.M.; CANPANINI, P.; SARTORI, S.; DOTTI, R.; COSTA, G. Main and interactive effects of shiftwork, age and work stress on health in an Italian sample of healthcare workers, Applied Ergonomics, 39 (2008) 630-639.
- DAHN, D.; LAUGHERY, K.R. The Integrated Performance Modelling Environment-Simulating Human-System Performance. In: Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference, Atlanta, Georgia, pp. 1141–1145, 1997.
- DAS, B. Development of a comprehensive industrial work design model. Hum. Fact. Ergon. Manufact. 9 (4), pp. 393–411, 1999.
- DIGIESI, S.; KOCK, A.A.A.; MUMMOLO, G.; ROODA, J. E. The Effect of Dynamic Worker Behavior on Flowtime Performance. International Journal of Production Economics, Volume 120, Issue 2, pp. 368-377, August, 2009.
- DUARTE, R. N. Simulação computacional: Análise de uma célula de manufatura em lotes do setor de autopeças. Dissertação de mestrado em engenharia de produção. UNIFEI, Itajubá, MG, 2003.
- EHRHARDT, L.; HERPER, H.; GEBHARDT, H. Modelling strain of manual work in manufacturing systems. In: Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference, Orlando, Florida, pp. 1044–1049, 1994.
- FISCHER, M.F. Condições de Trabalho e de Vida em Trabalhadores de Setor Petroquímico. São Paulo, (Tese de Livre Docência USP – Faculdade de Saúde Pública) p.342, 1990.
- FREUDENBERG, R.; HERPER, H. Simulation of Workers in Manufacturing Systems. In Medeiros, D.J., Watson, E.F., Carson, J.S., and Manivannan, M.S. (Eds), Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. 13-16 December, Washington, DC, pp. 951-956, 1998.
- FURNHAM, A. Personality at Work. Routledge, London, 1992.
- FURNHAM, A.; FORDE, L.; FERRARI, K. Personality and work motivation, Personality and Individual Differences. 26, pp.1035–1043, 1999.
- GARZA-REYES, J.A.; ELDRIDGE, S.; BARBER, K.D.; SORIANO-MEIER, H. Overall equipment effectiveness (OEE) and process capability (PC) measures: a relationship analysis, International Journal of Quality & Reliability Management, 27 (2010), 48-62.

Referências Bibliográficas

- GAUDART, C. Conditions for maintaining ageing operators at work—a case study conducted at an automobile manufacturing plant. *Applied Ergonomics* 31, pp. 453–462, 2000.
- GAVIRA, M. O. Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento. Dissertação de mestrado em engenharia de produção. USP, São Carlos, SP, 2003.
- GREASLEY, A. Using business-process simulation within a business-process reengineering approach. *Business Process Management Journal*, v.9, n.4, pp. 408-420, 2003.
- GREASLEY, A. Using process mapping and business process simulation to support a process-based approach to change in a public sector organization. *Technovation*, n.26, pp. 95-103, 2006.
- HACKMAN, J. R.; OLDHAM, G.R. Motivation through the design of work: test of a theory. *Organizational Behaviour and Human Performance* 16, pp. 250–279, 1976.
- HARREL, C.R; GHOSH, B.K.; BOWDEN, R. *Simulation Using Promodel*. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.
- HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. *Introduction to operations research*. McGraw-Hill, 2001.
- ICHNIOWSKI, C.; SHAW, K. The effects of human resource management systems on economic performance: An international comparison of US and Japanese plants. *Manag. Sci.* 45 (5), pp. 704–721, 1999.
- INGALLS, R.G. Introduction to Simulation. In Yücesan, E., Chen C.-H., Snowdon J.L., and Charnes, J.M. (Eds), *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*. 8-11 December 2002, San Diego, CA, pp. 7-16, 2002.
- JUNG, C.F. *Metodologia para pesquisa & desenvolvimento: aplicada a novas tecnologias, produtos e processos*. Rio de Janeiro/RJ: Axcel Books do Brasil Editora, 2004.
- KELTON, D.W.; SADOWSKI, R.P.; STURROCK, D.T. *Simulation with Arena*. 4.ed. New York: McGraw-Hill, 2007.
- KLEIJNEN, J.P.C. Theory and Methodology: Verification and validation of simulation models. *European Journal of Operational Research*, v.82, pp. 145-162, 1995.
- KLEIN, C.; FISCHER, B.; HARTNEGG, K.; HEISS, W. H.; ROTH, M. Optomotor and neuropsychological performance in old age. *Experimental Brain Research* 135, pp. 141–154, 2000.
- LAW, A.M. Simulation model's level of detail determines effectiveness. *Industrial Engineering*, v.23, n.10, pp. 16-18, 1991.
- LAW, A.M.; KELTON, D. W. *Simulation modeling and analysis*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
- LAW, A.M. How to conduct a successful simulation study. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, New Orleans, LA, USA, 2003.
- LAW, A.M. *Simulation modeling and analysis*. (4. ed., New York:McGraw-Hill, 2007).
- LAW, A.M. How to build valid and credible simulation models. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Austin, TX, USA, 2009.
- LEAL, F. Um diagnóstico do processo de atendimento a clientes em uma agência bancária através de mapeamento do processo e simulação computacional. Dissertação (Mestrado em Eng. Produção) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2003.
- LEAL, F. Análise do efeito interativo de falhas em processos de manufatura através de projeto de experimentos simulados. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

Referências Bibliográficas

- LEWIN, K. A Dynamic Theory of Personality: Selected papers. Translated by D.K. Adams and K.E.Zener, McGraw Hill Book Company Inc., London, 1935.
- MALIK, S.W.; KAPLAN, J. Deprivation sleep, *Prim Care*, 32 (2005) 475-90.
- MARCONI, M.A.; LAKATOS, E.M. Fundamentos de metodologia científica. São Paulo/SP: Editora Atlas, 2003.
- MILLER, D.P.; SWAIN, A.D. Human error and human reliability. In: G. Salvendy (Ed.), *Handbook Hum. Fact.*, Wiley-Interscience, New York, 1987.
- MITROFF, I.I.; BETZ, F.; PONDY, L.R.; SAGASTI, F. On managing science in the systems age: two schemas for the study of science as a whole systems phenomenon. *Interfaces*, v.4, n.3, pp. 46-58, 1974.
- MONTEVECHI, J.A.B.; LEAL, F.; PINHO, A.F. de; COSTA, R.F.S.; OLIVEIRA, M.L.M. de; SILVA, A.L.F. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Baltimore, USA, 2010.
- MUMMOLO, G.; MOSSA, G.; DIGIESI, S. Learning and tiredness phenomena in manual operation performed in lean automated manufacturing systems: a reference model. In: *International IMS Intelligent Manufacturing Systems Forum 2004*, Cernobbio, CO, Italy, pp. 341-346, 2004.
- MUNOZ, D.P.; BROUGHTON, J.R.; GOLDRING, J.E.; ARMSTONG, I.T. Age-related performance of human subjects on saccadic eye movement tasks. *Experimental Brain Research* 121, pp. 391-400, 1998.
- O'KANE, J.F.; SPENCELEY, J.R.; TAYLOR, R. Simulation as an essential tool for advanced manufacturing technology problems. *Journal of Materials Processing Technology*, n.107, pp. 412-424, 2000.
- OLIVEIRA, L.A.; BERTHOUD, E.M.C; BEGLIOMINI, R.A; COPPOLA, G.R. O trabalho noturno e suas repercussões na saúde e na vida cotidiana de trabalhadores metalúrgicos do Vale do Paraíba no estado de São Paulo. n.2, pp. 65-84, 2.v, 2006.
- PARKER, S.K.; WALL, T.D.; CORDERY, J.L. Future work design research and practice: Towards an elaborated model of work design. *J. Occupat. Organ. Psychol.* 74, pp. 413-440, 2001.
- PAUL, R.J. The Computer Aided Simulation Modeling Environment: An Overview. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, pp. 737-745, 1992.
- PEGDEN, C.D; SHANNON, R.E.; SADOWSKI, R.P. *Introduction to Simulation using Siman*, McGraw-Hill, 1995.
- PERERA, T.; LIYANAGE, K. Methodology for rapid identification and collection of input data in the simulation of the manufacturing systems. *Simulation Practice and Theory*, v.7, n.7 pp. 645-656, 2000.
- PIDD, M. *Tools for thinking: modeling in management science*. 4^aed., Chichester: John Wiley & Sons, 2000.
- PIDD, M. *Computer simulation in management science*. 5.ed. John Wiley & Sons, 2004.
- PINHO, A.F.; LEAL, F.; ALMEIDA, D.A. A integração entre o mapeamento de processo e o mapeamento de falhas: dois casos de aplicação no setor elétrico. XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Fortaleza, Ceará, 2006.
- REEB, J.E.; LEAVENGOOD, S. Introduction and overview for simulating a manufacturing system. Ext. Serv. EM 8837-E, Oregon State Univ. 12 pp., 2003.
- REILLY, T.; ATKINSON, G.; WATERHOUSE, J. Chronobiology and Physical Performance, in: Garret WE., Kirkendall DT (ed). *Exercise and sport science*. 1ed. Philadelphia: Willians &Wilkins, (2000) 351-372.
- ROBINSON, S. Simulation Projects: building the right conceptual model. *Industrial Engineering*, September 1994.

Referências Bibliográficas

- ROBINSON, S. Simulation model verification and validation: increasing the users' confidence. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Proceedings... Atlanta, GA, USA, 1997.
- RODRIGUES, F.V. Principais Impactos do trabalho em turnos: Estudo de Caso de uma Sonda de Perfuração Marítima. R. Un. Alfenas, Alfenas, 4: pp. 199-207, 1998.
- ROSA, R.R.; COLLIGAN, M.J. Plain Language About Shiftwork. DHHS (NIOSH), v. 97 p.145, 1997.
- RYAN, J.; HEAVEY, C. Process modeling for simulation. Computers in Industry, v.57, n.5, pp. 437–450, 2006.
- SALTHOUSE, T.A. Aging and measures of processing speed. Biological Psychology 54, pp. 35–54, 2000.
- SAND, P.; KLEINSCHNITZ, M.; VOGEL, P.; KAVVADIAS, D.; SCHREIER, P.; RIEDERER, P. Naturally occurring benzodiazepines may codetermine chonotypes, Journal of Neural Transmission, 108 (2001) 747-753.
- SARGENT, R.G. Verification and validation of simulation models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Proceedings... Austin, TX, USA, 2009.
- SCHIBYE, B.; HANSEN, A.F.; SOGAARD, K.; CHRISTENSEN, H. Aerobic power and muscle strength among young and elderly workers with and without physically demanding work tasks. Applied Ergonomics 32, pp. 425–431, 2001.
- SCHMIDT, B. The Modelling of Human Behaviour. SCS-Europe BVBA, Ghent, Belgium, 2000.
- SHANNON, R.E. Systems Simulation – The Art and Science. Prentice-Hall, 1975.
- SHANNON, R.E. Introduction to the art and science of simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Proceedings... Washington, DC, USA, 1998.
- SHEPARD, R.J. Aging and productivity: some physiological issues. International Journal of Industrial Ergonomics 25, pp. 535–545, 2000.
- SIEBERS, P.O. The Impact of Human Performance Variation on the Accuracy of Manufacturing System Simulation Models. (PhD thesis). Cranfield University, Cranfield, UK, 2004.
- SIEBERS, P.O. Worker Performance Modeling in Manufacturing Systems Simulation. Chapter in J-P. Rennard (Eds.) Handbook of Research on Nature. Inspired Computing for Economy and Management. Pennsylvania: Idea Group Publishing, 2006.
- SILVA, W.A. Otimização de parâmetros da gestão baseada em atividades aplicada em uma célula de manufatura. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2005.
- SNEL, J.; CREMER, R. Work and Aging: A European Perspective. Taylor and Francis, 1995.
- SOOKOIAN, S.; PIROLAA, C.J. Shift work and subclinical atherosclerosis: Recommendations for fatty liver disease detection, Atherosclerosis, 207 (2007) 346-347.
- SPENCER, M.B. The influence of irregularity of rest and activity on performance: a model based on time since sleep and time of day. Ergonomics 30 (9), pp. 1275–1286, 1987.
- STIRLING, M.H.; PARSONS, K.C. A model of human water balance. Journal of Thermal Biology 25, pp. 187–190, 2000.
- STONE, D.L.; EDDY, E.R. A model of individual and organizational factors affecting quality-related outcomes. J. Qual. Manag. 1 (1), pp. 21–48, 1996.
- TORIIZUKA, T. Application of performance shaping factor (PSF) for work improvement in industrial plant maintenance tasks. Int. J. Ind. Ergon. 28, pp. 225–236, 2001.

Referências Bibliográficas

VICENZI, D.A; WISE, J.A; MOULOVA, M.; HANCOCK, P.A. Human Factors in Simulation and Training. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, pp. 189-199, 2009.

WAIDELE, R.M. El trabajo em turnos nocturnos: uma revisión. Revista de Psiquiatria, v. 12, n.2, pp. 67-73, Chile, 1996.

WARR, P. Age and job performance, in: Work and Aging: A European Perspective. Taylor & Francis, 1995.

WRIGHT, T.P. Factors affecting the cost of airplanes. Journal of Aeronautical Sciences 3, pp.122–128, 1936.

YAMADA, Y.; KAMEDA, M.; NOBORISAKA, Y.; SUZUKI, H.; HONDA, M.; YAMADA, S. Excessive fatigue and weight gain among cleanroom workers after changing from an 8-hour to a 12-hour shift, Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, 27 (2001) 318-326.

ANEXO A – Artigos gerados a partir desta pesquisa

Artigos publicados em anais de congressos:

- **PAIVA, N.C. E MONTEVECHI, J.A.B.** *A Relevância do Fator Humano em Simulação Computacional*. In: XII Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais, São Paulo, SP, 2009.
- **PAIVA, C.N.; COSTA, R.F.S.; MONTEVECHI, J.A.B.; LEAL, F.** *Consideração de tolerâncias no tempo do trabalho humano em um modelo de simulação computacional*. In: XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Porto Seguro, BA, 2009.
- **PAIVA, N.C.; MONTEVECHI, J. A. B.; MIRANDA, R.C.** *Human Factor: Does it still a challenge for Discrete Event Simulation?* Simulation Modelling Practice and Theory. Em processo de avaliação por pares.