

Claudio Decker Junior

**COMPARAÇÃO DOS LEIAUTES FUNCIONAL, CELULAR E
CELULAR VIRTUAL UTILIZANDO PLANOS DE PROCESSOS
COM ALTERNATIVAS POR MEIO DE SIMULAÇÃO E
PROJETO DE EXPERIMENTOS**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós Graduação da Universidade Federal
de Santa Catarina para a obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia
Mecânica

Orientador: João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.
Coorientador: Fernando Martineli Loureiro, MSc.

**FLORIANÓPOLIS
2015**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Decker Junior, Claudio

Comparação dos leiautes funcional, celular e celular virtual utilizando plano de processos com alternativas por meio de simulação e projeto de experimentos / Claudio Decker Junior ; orientador, João Carlos Espíndola Ferreira ; coorientador, Fernando Martineli Loureiro. - Florianópolis, SC, 2015.

167 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Leiaute celular virtual. 3. Leiaute funcional e celular tradicional. 4. Simulação. 5. Projeto de experimentos. I. Ferreira, João Carlos Espíndola. II. Loureiro, Fernando Martineli. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Claudio Decker Junior

**COMPARAÇÃO DOS LEIAUTES FUNCIONAL, CELULAR E
CELULAR VIRTUAL UTILIZANDO PLANOS DE PROCESSOS
COM ALTERNATIVAS POR MEIO DE SIMULAÇÃO E
PROJETO DE EXPERIMENTOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 11 de Março de 2015.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr.Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Orientador: João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.: Fernando Antonio Forcellini, Dr.Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.: Paulo José de Freitas Filho, Dr.Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.: Glauco Garcia Martins Pereira da Silva, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

À minha esposa Daniela.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em primeiro lugar a Deus, nosso Pai criador, por sempre me indicar o melhor caminho a seguir. E a Nossa Senhora, nossa Mãe por sempre me proteger com seu manto.

Aos meus pais, Claudio e Lilia, por me apoiarem sempre, de forma incondicional, sem seu apoio jamais conseguiria alcançar esse objetivo.

A minha companheira, esposa, amiga, aquela que me aguenta todos os dias, Daniela - Sua compreensão em minhas escolhas foi me dando mais e mais força para alcançar a realização deste sonho. Seus puxões de orelha sempre me ajudaram a não perder o rumo.

Aos meus familiares por me entenderem e me apoiarem sempre, meu irmão Guilherme, a Paula, Sr. Valério, Dona Eva, Milena. Além desses, sem a ajuda do Engenheiro Guilherme José o trabalho teria sido muito, mas muito mais árduo. Obrigado por me auxiliar em tantos fins de semana, e me ajudar com a programação em Visual Basic, sem a sua ajuda eu não teria conseguido.

Um agradecimento muito, mas muito especial aos meus tios José e Teresinha Decker, que muitas vezes me receberam em sua residência em Florianópolis, dando todo o suporte necessário. Muito Obrigado também pelos bons finais de semana de divertimento que me proporcionaram. Deus abençoe sua família sempre!

Aos amigos que de uma forma ou de outra sempre me incentivaram nessa jornada, ao Paulo e a Talita, Bruno, que sempre disse que eu deveria ser professor, Kathyanni, Carina, Aldo, Wilian, Bárbara, Oliven, Gisele, Bruna, Douglas, Jean Davi. Um agradecimento muito especial ao Ricardo Wilbert, a Clarice e Roberto, sem eles eu jamais teria conhecido esse caminho! Obrigado, e obrigado pelas caronas Clarice e Roberto!

Não poderia deixar de expressar meu agradecimento aos amigos de mestrado, Letícia, Paola, Gislene, Nicholas e Emerson. Ao Marcelo, que investiu algumas horas nos estudos de Estatística. Ao Eduardo, por me aguentar nas caronas do trajeto Joinville-Floripa, e nos ensinamentos do Minitab, Muito Obrigado!

Ao POSMEC, através da Goreti e da Marieta, sempre dispostas a ajudar. Ao CNPq pelo apoio financeiro para execução desta pesquisa.

Finalmente ao meu Coorientador, Prof. Fernando Martineli Loureiro, que também investiu seu tempo em me auxiliar, foram algumas manhãs de sábado auxiliando na elaboração dos modelos no Arena, sanando dúvidas, muito obrigado! Sua dedicação me remete ao que um verdadeiro mestre deve ser. Cordial, paciente e sempre disposto a ajudar! Que Deus o abençoe, e a sua família!

E por fim, ao meu mentor, aquele que desde nossa primeira troca de e-mails se mostrou totalmente aberto a ajudar. Muito obrigado Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, por tudo que o senhor fez por mim. Sua dedicação aos seus alunos é algo que impressiona e motiva, seu exemplo de mestre me incentiva a cada dia ser um professor melhor, muito obrigado. Seu respeito e paciência são a base do caminho que trilhamos juntos nos últimos dois anos. Que Deus abençoe o senhor e toda a sua família!

Muito Obrigado a todos aqueles que não nomeei aqui, mas que, de alguma forma contribuíram com seus pensamentos para a conclusão dessa etapa da minha vida, já que a vida de estudos de um professor nunca acaba.

Espero que se orgulhem de mim, vou fazer o meu melhor para ser um professor a altura do que nossa sociedade precisa! A conclusão do mestrado é um sonho realizado.

RESUMO

A escolha adequada do sistema de gestão da produção, atrelado ao arranjo físico no chão de fábrica se mostra essencial para viabilizar a atividade fabril perante os desafios da atual economia globalizada. Cada vez mais, existe uma tendência do mercado a produtos mais especializados, tornando os ciclos de vidas menores e, como consequência, as empresas precisam ser tornar mais ágeis e flexíveis para se manterem competitivas. Grande parte da indústria opera no sistema de lotes de produção utilizando o leiaute funcional ou ainda o celular tradicional. O conceito de leiaute celular virtual surge então, visando reunir a alta flexibilidade de fabricação do leiaute funcional com a eficiência do sistema celular tradicional. Em contrapartida, o leiaute celular virtual pode apresentar as desvantagens de ambos. Apesar do conceito de leiaute celular datar de 1982, enunciado por McLean *et al.*, ainda existem poucas aplicações na indústria, apesar da vantagem competitiva apresentada na literatura. Atrelado ao arranjo físico o planejamento de processos consiste numa das atividades cruciais e de maior detalhamento na concepção de um projeto de produto. A adoção de alternativas em planos de processos pode ser uma opção proporciona mais rapidez e flexibilidade aos sistemas de manufatura. Para tanto, o presente trabalho está inserido no contexto da comparação dos leiautes funcional, celular tradicional e o celular virtual, e esta comparação é efetuada utilizando planos de processos com alternativas e planos convencionais por meio de simulação e projeto de experimentos. O objetivo da comparação consiste em verificar em quais situações cada tipo de leiaute resulta em melhores resultados. É utilizado o projeto fatorial completo e, para a simulação, é utilizado o software Arena, para o projeto de experimentos e a aplicação do método ANOVA é utilizado o software Minitab. Como resultado principal conseguiu-se mostrar as vantagens que o leiaute celular virtual teve para os valores de utilização de recursos, tempos de espera e o lead time, quando comparados aos outros dois modelos. Nota-se ainda uma lacuna no conhecimento quanto trata-se de trabalhos sobre leiautes celular virtuais, além disso esta pesquisa conseguiu ilustrar as vantagens do leiaute celular virtual utilizando um número menor de recursos do que a maioria da literatura apresenta.

Palavras-chave: células virtuais; plano de processos com alternativas; leiautes; simulação de sistemas; projeto de experimentos.

ABSTRACT

The right choice of the production management system, linked with the physical arrangement of the shop floor is essential to enable the manufacturing activity to meet the challenges of today's global economy. Increasingly, there is a tendency of the market to purchase more specialized products, shortening the life cycles of the products and, as a consequence, companies need to become more agile and flexible to remain competitive. Much of the industry operates on batch production using the job shop layout, or even the traditional cell layout. The concept of virtual cell layout then arises, which seeks to bring together the high flexibility of the job shop layout with the efficiency of the traditional cellular system. However, the virtual cell layout can present the disadvantages of both. Although the concept of cell layout dates from 1982, proposed by McLean *et al.*, there are still few applications in industry, despite its competitive advantage according to the literature. Together with the physical layout, process planning is one of the crucial and more detailed activities in the design and manufacture of a product. The adoption of alternatives in process plans may be an option that lead to faster and more flexible manufacturing systems. In this scenario, is proposed a comparison of three different layouts: job shop, traditional cellular, and the virtual cellular, and this comparison is performed using both process plans with alternatives and plans through simulation and design of experiments. The purpose of the comparison is to verify in which situations each type of layout leads to better results. Full factorial design is used and, for the simulation, the Arena software is used, and for the design of experiments and ANOVA the Minitab software is used. The main result could be shown the advantages that the virtual cell layout had to the resource utilization, waiting times and the lead time compared to the other two models. Note also known as a gap in it's work on virtual cell layouts besides this research was to illustrate the advantages of the virtual cell layout using fewer resources than the majority of the literature shows.

Keywords: virtual cells; process planning with alternatives; layouts; systems simulation; design of experiments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Ciclo Virtuoso do Desenvolvimento Tecnológico.....	26
Figura 2.1 – Tipos de Operações de Manufatura com relação ao Volume X Variedade	31
Figura 2.2 – Relação entre os tipos de processo e os tipos de leiautes..	34
Figura 2.3 – Tipos de Arranjo Físico	35
Figura 2.4 – Relação de variáveis que influenciam um sistema.....	53
Figura 2.5 – Combinações de teste de um Experimento Fatorial Completo 3x2x2.....	55
Figura 2.6 – Gráfico de interação das variáveis resposta para os fatores A e B	56
Figura 3.1 – Dimensões das <i>features</i> utilizadas na formação das peças prismáticas.....	62
Figura 3.2 – Dimensões das <i>features</i> utilizadas na formação das peças cilíndricas	62
Figura 3.3 – Estrutura do Modelo de Simulação.....	71
Figura 3.4 – Modelo Funcional.....	76
Figura 3.5 – Modelo celular tradicional	77
Figura 3.6 – Fatores de controle e variáveis resposta utilizados na simulação.....	81
Figura 4.1 – Dados de cada ferramenta para usinagem prismática (furadeiras e fresadoras).....	88
Figura 4.2 – Dados de cada ferramenta para usinagem cilíndricas (tornos)	88
Figura 4.3 – Planilha de dados com o cálculo dos tempos de usinagem de cada <i>feature</i>	89
Figura 4.4 – Planilha de dados “PlanoDeProcesso”	90
Figura 4.5 – Janela para inclusão dos valores de cada nível dos fatores de controle.....	91
Figura 4.6 – Planilha com a ordem de produção gerada	93
Figura 4.7 – Fluxograma para a geração das ordens de produção.....	94
Figura 4.8 – Combinações dos níveis de cada fator de controle	96
Figura 4.9 – possível peça gerada de acordo com os atributos do lote 10 da ordem de produção	96
Figura 4.10 – Fluxograma geral para os três modelos de simulação.....	99
Figura 4.11 – Leiaute funcional montado no Arena.....	101
Figura 4.12 – Fase inicial do modelo funcional	102
Figura 4.13 – Exemplo de departamento do leiaute funcional.....	102

Figura 4.14 – Fase final do leiaute funcional.....	103
Figura 4.15 – Modelo celular montado no Arena	104
Figura 4.16 – Fase inicial do leiaute celular	105
Figura 4.17 – Célula 1 do leiaute celular	105
Figura 4.18 – Célula 3 do leiaute celular	105
Figura 4.19 – Célula 2 do leiaute celular	106
Figura 4.20 – Fase final do leiaute celular	106
Figura 4.21 – Modelo leiaute celular virtual montado no Arena	107
Figura 4.22 – Fase inicial do modelo celular virtual.....	108
Figura 4.23 – Janela “dados da simulação”	110
Figura 4.24 – Variáveis e atributos dos modelos	110
Figura 4.25 – Parâmetros para a simulação	111
Figura 4.26 – Pasta com os arquivos dados de entrada.....	112
Figura 4.27 – Animação leiaute funcional.....	112
Figura 4.28 – Animação leiaute celular tradicional	113
Figura 4.29 – Animação leiaute celular virtual.....	113
Figura 4.30 – Relatório com os dados de saída do Arena.....	114
Figura 4.31 – Pasta com 256 resultados do modelo celular virtual.....	115
Figura 4.32 – Planilha com os resultados das simulações do leiaute celular virtual	116
Figura 5.1 – Gráfico de efeito no tempo final do leiaute funcional	120
Figura 5.2 – Gráfico de efeito na produtividade do leiaute funcional..	120
Figura 5.3 – Gráfico de efeito no estoque em processo do leiaute funcional	121
Figura 5.4 – Gráfico de efeito na utilização dos recursos do leiaute funcional	122
Figura 5.5 – Gráfico de efeito do tempo total de espera do leiaute funcional	123
Figura 5.6 – Gráfico de efeito do lead time do leiaute funcional.....	123
Figura 5.7 – Gráfico de efeito do tempo final do leiaute celular tradicional	124
Figura 5.8 – Gráfico de efeito da produtividade do leiaute celular tradicional	125
Figura 5.9 – Gráfico de efeito do estoque médio do leiaute celular tradicional	126
Figura 5.10 – Gráfico de efeito da utilização dos recursos do leiaute celular.....	126
Figura 5.11 – Gráfico de efeito do tempo total de espera do leiaute celular	127

Figura 5.12 – Gráfico de efeito do lead time do leiaute celular tradicional	128
Figura 5.13 – Gráfico de efeito do tempo final do leiaute celular virtual	129
Figura 5.14 – Gráfico de efeito da produtividade do leiaute celular virtual	129
Figura 5.15 – Gráfico de efeito do estoque médio do leiaute celular virtual	130
Figura 5.16 – Gráfico de efeito da utilização de recursos do leiaute celular virtual	131
Figura 5.17 – Gráfico de efeito do tempo total de espera do leiaute celular virtual	132
Figura 5.18 – Gráfico de efeito do lead time do leiaute celular virtual	132
Figura 5.19 – Gráfico de efeito do tempo final no leiaute.....	137
Figura 5.20 – Gráfico de efeito da produtividade no leiaute	137
Figura 5.21 – Gráfico de efeito do estoque médio no leiaute.....	138
Figura 5.22 – Gráfico de efeito do utilização de recursos no leiaute ..	139
Figura 5.23 – Gráfico de efeito do tempo de espera no leiaute	139
Figura 5.24 – Gráfico de efeito do lead time no leiaute	140
Figura 6.1 – Resultados médios para os três sistemas	144
Figura 6.2 – Intervalo de confiança para os três sistemas	144

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Fatores de controle a serem utilizados no experimento...	63
Quadro 3.2 – Dados de tempos de usinagem para cada <i>feature</i>	73
Quadro 3.3 – Tipos de máquina e suas operações.....	74
Quadro 3.4 – Tempos de Transportes	79
Quadro 3.5 – Distâncias percorridas	79
Quadro 3.6 – Tempos de setup.....	79
Quadro 4.1 – Dados de cada <i>feature</i>	87
Quadro 5.1 – Comparação Fatores de controle X variáveis resposta em cada tipo de leiaute.....	135
Quadro 5.2 – Comparação Fatores de controle X variáveis resposta..	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALGA	<i>Active Learning Genetic Algorithm</i>
ANOVA	Análise de Variância
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CAPP	<i>Computer-Aided Process Planning</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DOE	<i>Design Of Experiments</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
FMS	<i>Flexible Manufacturing System</i>
h	hora (unidade de tempo)
IPPS	<i>Integration Process Planning and Scheduling</i>
m/min	metros por minuto (unidade de velocidade de corte)
mm	milímetros (unidade de comprimento)
mm/rot	milímetros por rotação (unidade de avanço)
MS	Média Quadrática
pçs	peças (quantidade)
pçs/h	peças por hora (unidade de produtividade)
RE	<i>Resource Element</i>
SS	Soma Dos Quadrados
VBA	<i>Visual Basic for Application</i>
VCMS	<i>Virtual Cellular Manufacturing System</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	25
1.2 OBJETIVO GERAL	28
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
1.4 CONTRIBUIÇÃO	28
1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	29
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 SISTEMAS DE MANUFATURA.....	31
2.2 TIPOS DE LEIAUTE	32
2.2.1 Tecnologia de processo	37
2.2.2 Sistemas de manufatura com células virtuais	38
2.3 PLANEJAMENTO DE PROCESSOS	40
2.3.1 Geração dos Planos de Processo	41
2.4 PLANEJAMENTO DE PROCESSOS COM ALTERNATIVAS	43
2.4.1 Exemplo da aplicação de alternativas	44
2.4.2 Alternativas em Sistemas de Manufatura	46
2.4.3 Programação e Sequenciamento da Produção	48
2.4.4 Avaliação da Revisão da Literatura sobre Planejamento de Processos	49
2.5 SIMULAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE MANUFATURA	49
2.5.1 Simulação de Sistemas	49
2.6 PROJETO DE EXPERIMENTOS.....	52
2.6.1 Projeto Fatorial Completo	54
2.6.2 Projeto Fatorial 2k	56
2.6.3 ANOVA – Análise de Variância	56
2.7 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS.....	57

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	59
3.1 METODOLOGIA DA PESQUISA.....	59
3.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO.....	60
3.2.1 Software de Simulação	61
3.2.2 Features Utilizadas.....	61
3.2.3 Fatores de Controle.....	63
3.2.4 Variáveis Resposta	67
3.3 MODELO DE SIMULAÇÃO.....	69
3.3.1 Geração dos Lotes de Peças.....	71
3.3.2 Planejamento de Processo	72
3.3.3 Ordens de Fabricação.....	73
3.3.4 Modelagem do Sistema de Manufatura	74
3.3.5 Valores adotados aos sistemas de manufatura	78
3.4 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE MANUFATURA	80
3.4.1 Premissas adotadas no experimento.....	82
3.5 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS.....	82
4 IMPLEMENTAÇÃO.....	85
4.1 FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO	85
4.2 GERAÇÃO DAS ORDENS DE PRODUÇÃO.....	86
4.2.1 Etapas para a geração das ordens de produção	86
4.2.2 Procedimento utilizado para gerar as ordens de produção	92
4.3 SIMULAÇÃO DOS SISTEMAS DE MANUFATURA.....	97
4.4 DETERMINAÇÃO DA LÓGICA DO SISTEMA.....	98
4.4.1 Parâmetros gerais comuns aos três modelos	98
4.4.2 Lógica do leiaute funcional	100
4.4.3 Lógica do leiaute celular	103
4.4.4 Lógica do leiaute celular virtual	107
4.5 ATRIBUIÇÃO DE DADOS AOS TRÊS MODELOS	108

4.6 SIMULAÇÃO DOS MODELOS	109
4.7 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO	117
4.7.1 Verificação dos modelos.....	117
4.7.2 Validação.....	118
5 RESULTADOS.....	119
5.1 RESULTADOS PARA O LEIAUTE FUNCIONAL	119
5.1.1 Variável resposta tempo final (horas)	119
5.1.2 Variável resposta produtividade (peças/hora).....	119
5.1.3 Variável resposta estoque médio em processo (peças) .	121
5.1.4 Variável resposta utilização dos recursos (%).....	121
5.1.5 Variável resposta tempo total de espera (horas)	122
5.1.6 Variável resposta <i>lead time</i> (horas).....	122
5.2 RESULTADOS PARA O LEIAUTE CELULAR.....	124
5.2.1 Variável resposta tempo final (horas)	124
5.2.2 Variável resposta produtividade (peças/hora).....	124
5.2.3 Variável resposta estoque médio em processo (peças) .	125
5.2.4 Variável resposta utilização dos recursos (%).....	125
5.2.5 Variável resposta tempo total de espera (horas)	127
5.2.6 Variável resposta <i>lead time</i> (horas).....	127
5.3 RESULTADOS PARA O LEIAUTE CELULAR VIRTUAL .	128
5.3.1 Variável resposta tempo final (horas)	128
5.3.2 Variável resposta produtividade (peças/hora).....	128
5.3.3 Variável resposta estoque médio em processo (peças) .	130
5.3.4 Variável resposta utilização dos recursos (%).....	130
5.3.5 Variável resposta tempo total de espera (horas)	131
5.3.6 Variável resposta <i>lead time</i> (horas).....	131
5.4 OBSERVAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS DE CADA LEIAUTE	133
5.5 COMPARAÇÃO DOS LEIAUTES	135

6 CONCLUSÕES.....	141
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145
APÊNDICES	153
APÊNDICE I – TABELA QUE RELACIONA AS 40 <i>FEATURES</i> COM AS FERRAMENTAS E MÁQUINAS.....	153
APÊNDICE II – TABELA COM O CÁLCULO DOS TEMPOS DE USINAGEM DE CADA UMA DAS 40 <i>FEATURES</i>	155
APÊNDICE III – PARTE DO RASTREAMENTO (<i>TRACE</i>) REFERENTE A UMA SIMULAÇÃO DO MODELO LEIAUTE CELULAR VIRTUAL.....	157
APÊNDICE IV – PLANILHA DE RESULTADOS PARA O LEIAUTE CELULAR VIRTUAL	161
APÊNDICE V – VALORES CALCULADOS PARA AS ANÁLISES DE VARIÂNCIA (ANOVA) MEDIANTE O SOFTWARE MINITAB.....	168
APÊNDICE VI – GRÁFICO DE PARETO – LEIAUTE FUNCIONAL.....	170
APÊNDICE VII – GRÁFICO DE PARETO – LEIAUTE CELULAR	173
APÊNDICE VIII – GRÁFICO DE PARETO – LEIAUTE CELULAR VIRTUAL	176

1 INTRODUÇÃO

O tema desta dissertação refere-se à comparação dos leiautes funcional, celular e celular virtual, utilizando plano de processos com alternativas por meio de simulação e projeto de experimentos.

Os tópicos descritos nesta introdução buscam apresentar o contexto e a justificativa da pesquisa, os objetivos a serem atingidos, a contribuição e a estrutura da dissertação.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O mercado cada vez mais globalizado exige um desempenho diferenciado de cada organização, para a sua sustentação frente aos desafios que se apresentam. Tais desafios, muitas vezes, só podem ser superados por meio da redução contínua dos tempos das atividades que não agregam valor para o cliente (SLACK *et al.*, 2009).

Portanto, para se conquistar novos mercados ou mesmo atender os mercados atuais, é preciso atingir cada vez mais elevados padrões de qualidade, produtividade e flexibilidade, tendo em vista os efeitos da globalização, a qual permite que as empresas ofertem seus produtos em qualquer lugar do planeta (ZATTAR, 2008).

Existem algumas questões que inibem ou dificultam o crescimento das empresas de um modo geral. Para Kennerly e Neely (2003), fatores como qualidade, produtividade e flexibilidade têm sido relevantes para a obtenção de resultados positivos pelas empresas.

Para buscar melhorar este cenário, Campos (1999) preconiza que a base para o sucesso está na educação voltada ao desenvolvimento tecnológico, tendo em vista que a educação tecnológica permite iniciar um ciclo virtuoso de desenvolvimento tecnológico (Figura 1.1).

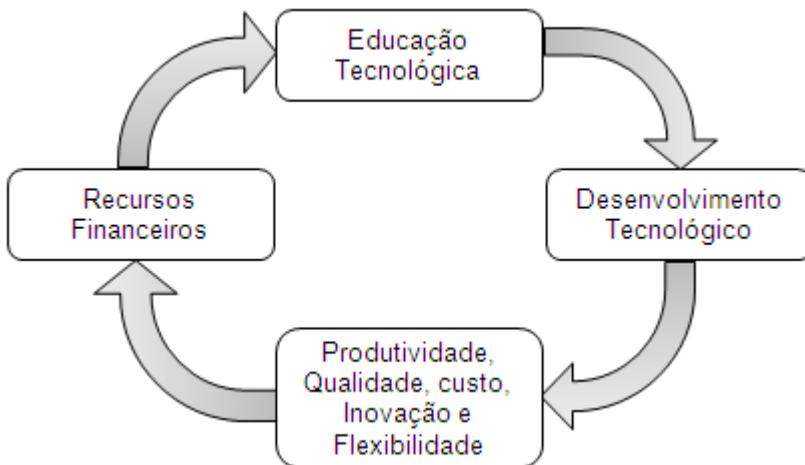


Figura 1.1 – Ciclo Virtuoso do Desenvolvimento Tecnológico
 Fonte: Adaptado de Campos (1999)

Segundo Fung *et al.* (2008), para evoluir no mercado as empresas precisam responder rapidamente as necessidades do mercado, sejam elas na concepção de novos produtos, com velocidade e flexibilidade, ou ainda na redução de custos, mas sempre visando atender as necessidades dos clientes.

Segundo Brennan e Foroughi (1999), a manufatura vem mudando suas características, e isso afeta a forma como suas funções devem ser vistas e executadas. Inúmeras vezes no chão de fábrica não é possível atender a requisitos importantes como qualidade, produtividade, flexibilidade, custos, inovação, qualidade, entre outros, devido à ocorrência de problemas. Para isto contribuem problemas como leiaute inadequado, tempos de *setup* (preparação) elevados, estoques elevados, complexidade dos produtos, etc.

Imprevistos como quebras de máquinas, indisponibilidade e sobrecarga de determinado recurso acabam por afetar diretamente os requisitos necessários para que a empresa possa ser cada vez mais competitiva.

Ainda segundo Brennan e Foroughi (1999), esses imprevistos podem acontecer durante a execução de uma determinada ordem de serviço. Isso pode se tornar um problema, já que recursos precisarão ser redefinidos para o cumprimento daquela ordem. Assim, o plano de processos precisa ser refeito, pois ele contém todas as informações necessárias à execução da ordem de produção.

Para tanto, o ideal seria que o processista (indivíduo responsável pela elaboração do plano de processos) refizesse o plano. Porém, muitas vezes, em função da dinâmica do mercado e dos prazos cada vez mais curtos, essa atividade acaba sendo executada pelos próprios operadores ou responsáveis pela produção, ou então pelos próprios processistas sob elevada pressão. Nesses casos, a chance de erros e novos atrasos são grandes.

Diante deste cenário, a utilização de planos de processos com alternativas pré-estabelecidas pode vir a ser vantajoso, pois um recurso alternativo previamente selecionado pode ser incluído durante a elaboração do plano de processos. A presença de alternativas pré-planejadas podem vir a proporcionar mais flexibilidade na tomada de decisões (FERREIRA; WYSK, 2001a, 2001b).

Infelizmente, a adoção das alternativas em planos de processo ainda é pouco utilizada pelos processistas, devido à falta de conhecimento dessa estratégia, além da necessidade de novos estudos que venham a avaliar a sua eficácia.

Sob outra ótica, Kilwhani *et al.* (2011) evidenciam que a escolha adequada da configuração do leiaute no chão de fábrica é fundamental para viabilizar e aumentar a competitividade de uma empresa na atual economia globalizada.

Segundo Slack *et al.* (2009), os cinco principais tipos de processo (projeto, *jobbing*, lotes, massa e contínuo) adaptam-se a basicamente quatro tipos de arranjos físicos ou leiautes: posicional, por processo (*job shop* ou funcional), celular e por produto (*flow shop*). Além disso, sua relação é definida de acordo com a relação Volume X Variedade dos produtos a serem fabricados.

Tanto a redução dos tempos de fluxo e de *setup* como a flexibilidade de roteiro são características muito importantes para a viabilidade do negócio. Buscando aliar essas duas características, surge o conceito das células virtuais.

De acordo com Mclean *et al.* (1982), que são os criadores do conceito de célula virtual, uma célula virtual é composta por máquinas de diferentes departamentos que são associadas logicamente durante certo intervalo de tempo. Essas máquinas funcionam como células de manufatura para atenderem a produção como em um sistema celular tradicional, ainda que fisicamente estejam dispostas como no arranjo funcional. Uma célula virtual não é identificável por um agrupamento físico, mas por arquivos de dados e processos dentro de um controlador da produção.

1.2 OBJETIVO GERAL

Tem-se por objetivo geral deste trabalho comparar os leiautes funcional, celular e celular virtual, considerando as vantagens de cada tipo de leiaute, utilizando planos de processos com alternativas.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar os três sistemas de manufatura (funcional, celular e celular virtual) envolvendo diferentes tipos de processos, como torneamento, furação e fresamento, em um software de simulação (é usado o software Arena versão 9);
- Empregar o projeto de experimentos (*Design Of Experiments - DOE*), podendo-se identificar e validar os fatores e níveis mais significativos, e as principais variáveis resposta para a análise do desempenho de cada um dos três leiautes diferentes (é usado o Software Minitab versão 16);
- Apresentar a existência de uma lacuna no conhecimento quanto ao tema das células virtuais;

1.4 CONTRIBUIÇÃO

Esta pesquisa apresenta a comparação dos três tipos de leiaute, a saber: o funcional, o celular tradicional e o celular virtual. Cada um desses leiautes contém 10 máquinas, 8 operadores e 3 abastecedores. Posteriormente é feita uma análise dos fatores de controle, incluindo a presença de alternativas nos planos de processos. Os resultados alcançados por meio da simulação e do projeto de experimentos de cada leiaute são analisados estatisticamente.

Pretende-se com isso mostrar quais fatores influenciam ou não determinada variável resposta em um determinado tipo de leiaute. Academicamente, espera-se fomentar ainda mais o conceito do leiaute do tipo celular virtual, mostrando suas vantagens para determinadas situações que serão simuladas, perante os outros dois tipos de leiaute. E ainda, através dos resultados, busca-se motivar empresas que queiram aplicar o conceito de leiaute celular virtual em seu parque fabril.

1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Torna-se extremamente importante colocar certos limites na pesquisa, para que os leitores possam compreender exatamente como a pesquisa foi desenvolvida e os resultados foram alcançados.

Partindo do padrão adotado por Mello (2005) o qual não considerou o tipo de leiaute, apenas buscou mostrar que o uso de alternativas proporciona vantagens aos sistemas de manufatura. Já Reaes (2008), até por se tratar de uma tese de doutorado, apresentou uma pesquisa mais abrangente, concluindo que o sistema de manufatura por leiaute celular virtual tem um desempenho superior aos leiautes funcional e celular tradicional. Porém, Reaes (2008) não considerou de maneira detalhada o projeto de produtos, limitando-se a 50 tipos de peças diferentes.

A presente pesquisa baseou a formação de peças na aleatoriedade, ou seja, estipulou-se um universo de *features* a partir das quais poder-se-ia gerar uma infinidade de diferentes produtos, tentando estimular um cenário mais próximo possível da realidade, onde o mercado exige cada vez mais flexibilidade, variedade de *mix* de produtos e ainda ciclos de vidas cada vez mais curtos para os produtos.

Dito isto, a presente pesquisa modelará três sistemas de manufatura diferentes, um para cada tipo de leiaute. Porém o que pretende-se aqui é buscar a comparação entre os leiautes. As questões mais complicadas estarão relacionadas ao leiaute celular tradicional. Já que para o referido sistema não será trabalho o conceito clássico da célula como o *lean manufacturing* sugere. Não existirá fluxo contínuo e nem lotes unitários. Além disso a formação das três células se deu através do tipo de produto. Uma célula irá atender peças prismáticas, a segunda célula atenderá peças mistas e por fim, a terceira célula fabricará apenas peças cilíndricas. Serão considerados tempos de setup e quem fará o transporte interno na célula será o abastecedor.

Além disso existe uma limitação com relação a flexibilidade de operadores, que foi utilizada de forma simplificada nesta pesquisa, onde a única flexibilização que existirá será do operador que operar a furadeira irá também operar a fresadora CNC.

Com relação ao tempo de chegada entre os lotes, esse foi um fator de controle, quer irá sequenciar a chegada dos lotes através de percentuais de tempo, tornando os três modelos empurrados sob o ponto de vista produtivo.

Outro fator relevante que limita a pesquisa está relacionado ao fator de controle manutenção. Estabeleceu-se o seguinte critério. Quando o modelo não possuía um plano de manutenção estabelecido os recursos ficam sujeitos a ocorrência de falhas. Porém, quando havia um plano de manutenção estabelecido, a disponibilidade dos recursos foi de 100%, ou seja, eventuais tempos referentes as manutenções preventivas e preditivas já foram descontados.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Neste tópico apresenta-se a estrutura da dissertação, a qual é composta pelos seguintes capítulos:

No capítulo 1 são abordadas a contextualização e a justificativa da pesquisa, contendo os objetivos geral e específicos e a contribuição da pesquisa desenvolvida.

Na Revisão Bibliográfica, capítulo 2, buscar-se-á apresentar o estado da arte referente a assuntos como sistemas de manufatura, arranjo físico, planejamento de processos com alternativas, simulação e projeto de experimentos.

No capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada no trabalho. São abordadas as tratativas referentes ao planejamento do experimento, bem como a estruturação do modelo para a simulação. Dar-se-á uma visão geral do experimento de simulação, destacando as *features* utilizadas, a identificação dos fatores de controle e seus respectivos níveis, bem como as variáveis resposta.

O capítulo 4, denominado de Implementação, apresenta como foi implementado o modelo no software Arena, versão 9. Por sua vez, esse capítulo está dividido em duas etapas: a geração das ordens de produção e a simulação do sistema de manufatura propriamente dito.

Os resultados obtidos com a simulação, bem como a análise desses resultados de acordo com o que foi estabelecido, serão apresentados no capítulo 5. A análise utilizando o software Minitab, versão 16, é descrita nesse capítulo.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas por meio dos resultados da simulação, bem como a verificação de quais objetivos traçados foram atingidos. No fim, estabelece-se algumas recomendações para possíveis trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico será apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre os itens principais que serão abordados no decorrer desta pesquisa. Serão apresentados os principais sistemas de manufatura, bem como os tipos de leiaute. O planejamento de processos convencional (sem alternativas) e com alternativas. Depois serão apresentadas as formas utilizadas para avaliar o desempenho dos sistemas de manufatura, a técnica de simulação em conjunto com o projeto de experimentos.

2.1 SISTEMAS DE MANUFATURA

Campinini (2008) cita que qualquer sistema é composto por três elementos básicos: as entradas (*inputs*), os processos de transformação, e as saídas (*outputs*). Sistemas de manufatura são sistemas de produção que produzem bens, os quais são geralmente tangíveis. Caso o sistema de produção produza serviços então ele é chamado sistema de serviço (MARTINICHI, 1997 apud GODINHO FILHO, 2004). Segundo Forcellini (2013), as operações produzem produtos e serviços por meio da transformação de entradas em saídas, e um sistema de manufatura normalmente contém diversas operações.

Slack *et al.* (2009) classificam as operações dos sistemas de manufatura em cinco grupos, conforme ilustrado na Figura 2.1: projeto, processo, lotes, em massa e contínuo.

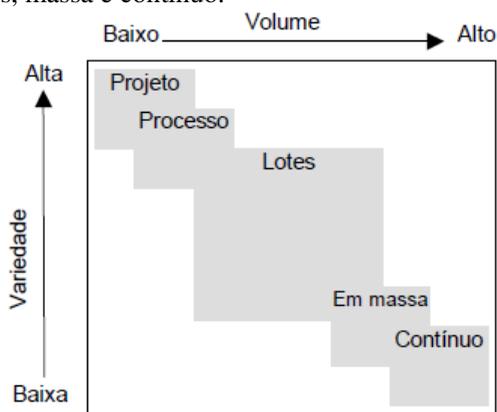


Figura 2.1 – Tipos de operações de manufatura com relação ao Volume X Variedade

Fonte: Adaptado de Slack *et al.* (2009)

O grupo projeto tem como característica a alta variedade e baixo volume, e nesse grupo encontram-se produtos bastante customizados. Exemplos deste tipo de operação envolve construção de navios a produção de filmes.

O grupo processo (*jobbing*) também lida com variedade alta e baixos volumes, enquanto em projeto os produtos possuem recursos dedicados. Em processo cada produto compartilha os recursos com outros produtos, e Slack *et al.* (2009) citam como exemplo a engenharia especializada e restauradores de móveis.

O grupo de manufatura por lotes é muito frequente nas instalações industriais, apresentando uma relação equilibrada entre volume e variedade, atendendo uma maior gama de clientes (CHIN, 2013).

No grupo de lotes o volume produzido é um pouco maior que os demais supracitados, porém sua variedade é menor. Nesse grupo a produção é realizada em lotes que se repetem de acordo com a necessidade de cada produto (TUBINO, 1997). Como exemplo pode-se citar a produção de subconjuntos da indústria automotiva.

Na produção em massa verifica-se uma redução ainda maior na variedade e um aumento no volume produzido. A variação de operações é pequena e isso possibilita utilizar equipamentos especializados com alto volume, como automóveis e a maior parte de processamento de alimentos.

Por fim, tem-se o grupo da produção contínua, no qual observa-se um fluxo ininterrupto e com baixa variedade. Exemplos de sistemas de produção contínua são refinarias de petróleo e indústrias têxteis.

2.2 TIPOS DE LEIAUTE

O leiaute estabelece a localização física dos recursos transformadores, ou seja, as instalações, máquinas, equipamentos, pessoas, operadores, etc. Além disso, estabelece como os recursos transformados (i.e. matéria-prima, materiais, peças, etc.) devem fluir ao longo das operações.

Segundo Kilwhani *et al.* (2011), o tipo de leiaute deve privilegiar o fluxo, visando reduzir os custos e aumentar a eficiência produtiva.

Slack *et al.* (2009) citam a importância do leiaute para os sistemas de manufatura, principalmente porque reorganizar o leiaute de uma operação existente acarreta muitas vezes interromper o fornecimento atual. Erros no projeto do leiaute podem gerar confusões no fluxo, estoques desnecessários, grandes filas, pouca flexibilidade e altos custos.

A disposição de recursos transformadores em uma instalação afeta diretamente os custos de produção e a produtividade. Uma alocação de recursos racional contribui significativamente para o aumento da eficiência das operações e reduções dos custos de movimentação (DRIRA *et al.*, 2007).

Ainda, segundo Baykasoglu e Gocken (2010), qualquer mudança de leiaute é frequentemente uma atividade difícil, de longa duração e custo.

A partir da definição do tipo de processo de manufatura, em função da relação volume variedade, deve-se decidir qual será o tipo de leiaute mais adequado.

Slack *et al.* (2009) citam quatro tipos básicos de arranjo físico: posicional, funcional, celular e por produto (linha). Já Martins e Laugeni (2005) empregam uma classificação idêntica, diferenciando-se apenas pela nomenclatura: onde se diz leiaute por produto, Martins e Laugeni (2005) empregam o termo leiaute em linha.

No arranjo físico posicional os recursos transformados não se movem, ou seja, quem sofre a transformação fica parado, e os equipamentos, maquinário, instalações e pessoas movem-se quando necessário. Como exemplo deste tipo de arranjo tem-se a construção de uma rodovia (SLACK *et al.*, 2009).

No arranjo físico funcional ou departamental (funcional) os recursos ou processos similares são localizados juntos uns dos outros. Para que os produtos e as informações percorram ao longo das operações é necessário um roteiro das atividades. Diferentes peças e produtos terão diferentes necessidades e, geralmente, este fluxo se torna bastante complexo. Como exemplo pode-se citar uma oficina de prestação de serviços de usinagem ou ferramentaria (SLACK *et al.*, 2009).

Contudo, as práticas de produção que exigem pequenos tamanhos de lotes podem acentuar as desvantagens desse tipo de leiaute, aumentando o custo de movimentação, estoque em processo e tempo de produção (FRAMINAN, 2007).

O arranjo físico celular é aquele em que as peças e produtos a serem fabricados são atribuídos a famílias. Cada família corresponde a um conjunto de peças que possuem semelhanças geométricas ou tecnológicas. Cada peça movimenta-se em uma célula composta tipicamente por máquinas de características diferentes dispostas próximas umas às outras. Desta forma busca-se diminuir o fluxo de materiais e os *setups* típicos do leiaute funcional (KANNAN; GOSH, 1996a).

Drolet *et al.* (1996) citam que a manufatura celular exige muito menos controle e manipulação de materiais.

Segundo Slack *et al.* (2009), o arranjo físico por produto (*flow shop*) envolve posicionar os recursos transformadores inteiramente segundo a melhor conveniência da peça ou produto que está sendo transformado. Por este motivo, algumas vezes esse tipo de arranjo pode ser descrito como “em linha”, segundo Martins e Laugeni (2005). Como exemplos típicos pode-se citar a fabricação de um virabrequim, e a montagem de automóveis.

Slack *et al.* (2009) citam ainda os arranjos mistos, que combinam elementos de diferentes arranjos básicos. Por exemplo, um hospital tipicamente possui um arranjo funcional, dividido em departamentos, porém estes departamentos internamente podem possuir outros tipos de arranjo. No caso, o setor de radiologia pode se arranjar por processo, já o laboratório de análises pode se organizar como um arranjo por produto.

Na Figura 2.2 apresenta-se as possibilidades de leiautes para cada tipo de processo citado anteriormente. Tem-se, por exemplo, a produção por lotes, que pode admitir tanto um leiaute por processo (funcional) quanto o celular tradicional.

TIPOS DE PROCESSO DE MANUFATURA	TIPOS BÁSICOS DE LEIAUTE
Processo por Projeto	Leiaute Posicional
Processo Tipo <i>Jobbing</i>	
Processo Tipo Lote	Leiaute por Processo
Processo em Massa	Leiaute Celular
Processo Contínuo	Leiaute por Produto

Figura 2.2 – Relação entre os tipos de processo e os tipos de leiautes

Fonte: Adaptado de Slack *et al.*, (2002)

Segundo Reaes (2008), na literatura não se encontram nessa classificação as células virtuais. Um dos objetivos do leiaute celular virtual consiste em reduzir os tempos de fluxo e de *setup*, além de aumentar a flexibilidade de roteiro.

Fisicamente as máquinas em cada célula virtual estão próximas de máquinas de outros departamentos, de forma semelhante ao arranjo funcional, onde recursos idênticos ficam juntos (KANNAN; GOSH, 1996a, 1996b). Porém, as células virtuais operam virtualmente como células do ponto de vista lógico, ou seja, os recursos são dedicados à manufatura de uma família de peças, como as células tradicionais.

No momento em que é finalizada a ordem de fabricação da família de peças a ser fabricada, a formação virtual celular é desfeita logicamente, podendo cada recurso individualmente tornar a se agrupar com outros e constituir uma nova célula virtual (SURESH; SLOMP, 2005).

A Figura 2.3 ilustra alguns tipos dos arranjos apresentados.

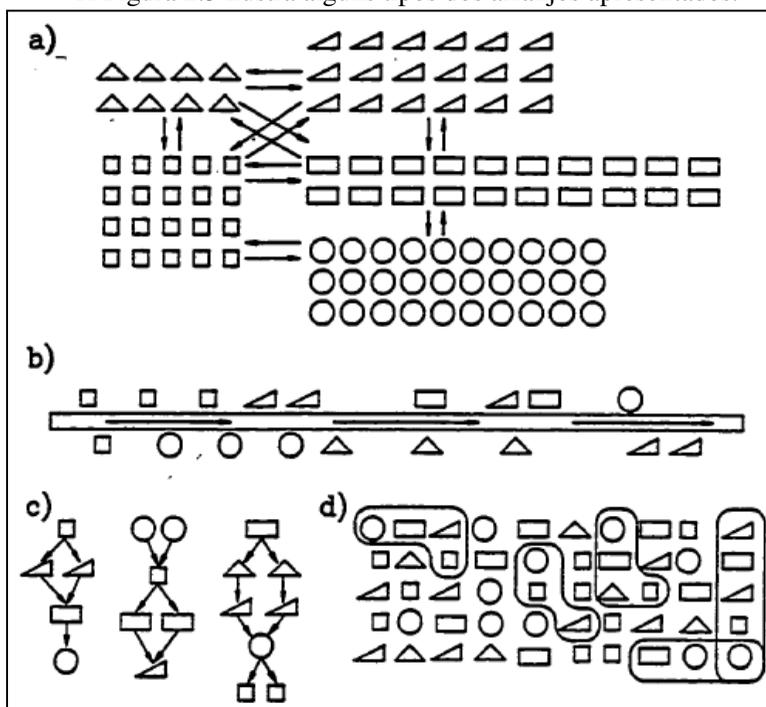


Figura 2.3 – Tipos de Arranjo Físico

Fonte: Drolet (1989)

Os recursos são representados por formas geométricas, segundo Drolet (1989). A Figura 2.3(a) ilustra um arranjo tipicamente funcional, onde os recursos iguais são divididos em departamentos. Já a Figura 2.3(b) apresenta um arranjo por produto (linha), onde os recursos estão

distribuídos para atender as operações necessárias a determinado tipo de produto, aqui o volume é alto e a variedade é pequena.

Na Figura 2.3(c) Drolet (1989) apresenta um arranjo celular tradicional, e por fim na Figura 2.3(d) é apresentado um arranjo do tipo celular virtual. Os 50 recursos estão espalhados aleatoriamente no chão de fábrica. De acordo com a necessidade das famílias de produtos, os recursos são logicamente agrupados e efetuam a produção dos lotes. Posteriormente são desagrupados e podem se rearranjar para atender a outros pedidos.

Ainda, segundo Drolet (1989), um sistema de manufatura de células virtuais inclui uma grande variedade de diferentes recursos, e essa variedade está atrelada às necessidades tecnológicas requeridas pelo sistema.

Segundo Reaes (2008), a escolha adequada do leiaute a ser utilizado em um sistema de manufatura está atrelada à relação volume X variedade. Com isso, os leiautes influenciam e muito os resultados operacionais das empresas as quais, por sua vez, buscam leiautes mais flexíveis com menores tempos de movimentação, bem como custos de transporte. Isto para que possam acomodar uma vasta gama de requisitos produtivos (HAMEDI *et al.*, 2012a).

Como o objetivo deste trabalho é comparar os sistemas de manufatura com leiautes funcional, celular tradicional e celular virtual, torna-se importante destacar as principais características desses três leiautes.

Conforme apontam Martins e Laugeni (2005) e Slack *et al.* (2009), as características do leiaute funcional são:

- Máquinas agrupadas por processos semelhantes;
- Tempos altos de movimentação;
- Alta variedade e baixa quantidade de produtos;
- Alta flexibilidade;
- Baixa utilização dos equipamentos;
- Tendência de estoques e filas;
- Cada produto pode ter uma ordem de fabricação diferente, com fluxo complexo, difícil de controlar;
- Tempos elevados de *setup*.

As características do leiaute celular tradicional, conforme os mesmos autores, são:

- Máquinas de processos distintos são agrupadas em células;
- O roteiro de fabricação é mais simples, facilitando o controle;

- Tempos menores de movimentação;
- Variedade menor e alta quantidade de produtos;
- Flexibilidade pequena. A célula processa família de peças;
- Redução dos estoques em processos e filas;
- Tempos de *setup* reduzidos.

De acordo com Drolet (1989) e Reaes (2008) as principais características do leiaute celular virtual são:

- As máquinas estão distribuídas pela fábrica. Porém ao longo do tempo, as máquinas são agrupadas em células virtuais, ou seja, não são movimentadas fisicamente;
- Cada produto pode ter uma ordem diferente de fabricação, fluxo complexo;
- Tempos altos de movimentação;
- Alta flexibilidade;
- Baixa utilização dos equipamentos;
- Tempos de *setup* reduzidos;
- Reúne características muito positivas de cada uma das configurações anteriores, como redução dos tempos de fluxo e *setup*. Com isso, reduz-se os estoques em processo e filas;
- Também reúne as características negativas dos anteriores, como percursos maiores para movimentação e, muitas vezes, capacidade adicional de recursos;
- Baixa utilização dos equipamentos.

2.2.1 Tecnologia de processo

Além dos tipos de leiautes mostrados, existem outros leiautes que surgiram com o desenvolvimento de tecnologias de manufatura, que permitiram que as máquinas realizassem uma grande variedade de operações diferentes (ALTIOK, 1996).

Surgem então as linhas flexíveis (*transfer*), em que um sistema automatizado, com robôs, dispositivos de movimentação computadorizados e máquinas específicas é dedicado a um determinado conjunto de produtos.

Outro conceito que emerge são os sistemas flexíveis de manufatura (FMS). Nesses sistemas se pretende obter um elevado nível de automação com alta flexibilidade, ou seja, implementar automação,

com flexibilidade, em relação ao volume e os tipos de produtos (REDDY; RAO, 2011).

As tecnologias de processo podem ou não envolver o uso de recursos sofisticados, não se resumindo aos recursos mais modernos disponíveis no mercado. Para Slack *et al.* (2002), a tecnologia de processo consiste na utilização de máquinas, equipamentos e dispositivos que visam auxiliar a agregação de valor ao produto.

2.2.2 Sistemas de manufatura com células virtuais

Xambre e Vilarinho (2007) citam que existem duas maneiras de implementar um sistema de manufatura celular: o formato físico (chamado de convencional pela literatura) e o conceito lógico, conceito este que está sendo chamado de células virtuais.

Khilwani *et al.* (2011) ressaltam que os sistemas de manufatura por células virtuais são um novo tipo de sistema de manufatura celular, sendo uma alternativa interessante para a criação de células em tempos real.

O estudo proposto por Khilwani *et al.* (2011) foi realizado para projetar as células virtuais que maximizem a similaridade e minimizem o *lead time* do processo.

Khilwani *et al.* (2011) ainda ressaltam que a ideia dos sistemas de manufatura com células virtuais é de formar grupos lógicos de recursos, permitindo o compartilhamento de máquinas para que o sistema seja capaz de responder às frequentes mudanças de demanda do mercado.

Uma das conclusões de Khilwani *et al.* (2011) é que mostram a necessidade de se estudar mais profundamente as células virtuais, e que os benefícios do uso de células virtuais aumentam com o acréscimo dos tipos de máquinas requeridas para o processamento de uma determinada peça.

Hamedi *et al.* (2012b) também ressaltam que cada vez mais o *mix* de produção e as flutuações de demanda exigem uma resposta cada vez mais rápida dos sistemas de manufatura. Com isso, o conceito de sistemas de manufatura com células virtuais se tornam eficientes.

Considerando que as pesquisas sobre sistemas de manufatura por células virtuais (VCMS) ainda se encontram em fase preliminar, nota-se que esse conceito ganhou força na última década. Cada vez mais uma variedade de técnicas tem sido desenvolvida para solucionar problemas de formação de células virtuais (HAMEDÍ *et al.*, 2012b).

Hamedi *et al.* (2012b) apresentam uma revisão sobre os recentes esforços e o que tem sido desenvolvido na área de sistemas de manufatura por células virtuais (VCMS). Eles concluem que os sistemas de manufatura de células virtuais são uma nova tecnologia de produção, que teve impulso em função da dinâmica com a qual o mercado se apresenta.

Outro ponto que os autores ressaltam é o fato do crescimento do número de técnicas para solucionar o problema que envolve a formação das células virtuais, principalmente devido à sua complexidade e importância dentro do sistema.

Segundo Hamedi *et al.* (2012b) os trabalhos sobre sistemas de manufatura por células virtuais envolvem a formação de células com base nos tipos de máquinas. Entretanto, tais trabalhos não estão utilizando as vantagens significativas da abordagem de elemento de recurso (RE).

O método convencional baseado nas máquinas não fornece detalhes suficientes para formar células virtuais, principalmente porque algumas operações podem ser realizadas em mais de uma máquina, e ainda utilizando mais de um operador.

Vale salientar que esta pesquisa considera essa situação dentro do escopo proposto, que é o planejamento de processo contendo alternativas.

Por fim, Hamedi *et al.* (2012b) citam que a programação matemática parece ser uma das alternativas mais adequadas para a formação de células virtuais, principalmente pelo fato de integrar muitos fatores, conseguindo-se assim as melhores soluções para a problemática que envolve a formação de células virtuais.

Além desta pesquisa, Hamedi *et al.* (2012a) apresentam outra pesquisa mais específica com relação ao processo de formação de células virtuais. Essa pesquisa baseia-se na capacidade dos sistemas de manufatura de células virtuais, utilizando um modelo de programação não-linear. Segundo os autores, células virtuais tiveram um desempenho superior quando comparado a sistemas com células convencionais.

Também, Hamedi *et al.* (2012c) apresentam que a escolha do leiaute mais adequado proporciona uma melhora no desempenho dos VCMS, principalmente quando o fluxo de materiais é reduzido.

Para comprovar o proposto, os autores propuseram um modelo matemático multi-objetivo através de programação, baseando a abordagem nos elementos-recursos. Hamedi *et al.* (2012c) verificaram o desempenho e a validade do modelo mediante um exemplo numérico tomado da literatura. Para comparar o desempenho do sistema de

manufatura por células virtuais com o sistema de fabricação celular tradicional, foi utilizado o critério da capacidade de utilização da célula.

Hamed *et al.* (2012c) mostram, por fim, que as empresas podem tirar proveito dos sistemas de manufatura por células virtuais, principalmente as empresas que trabalham com um ambiente produtivo muito dinâmico.

O resultado mostra que os sistemas de manufatura por células virtuais baseados nos elementos de recurso (RE) tendem a proporcionar mais flexibilidade e um menor fluxo de componentes, seguindo o modelo apresentado pelos autores.

Nota-se que a definição do produto, do tipo de sistema de manufatura e do layout do sistema de manufatura não permite a fabricação efetiva dos produtos. Faz-se necessário também estabelecer o elo entre o projeto do produto e a manufatura, que é o planejamento de processos (CHANG *et al.*, 2005).

2.3 PLANEJAMENTO DE PROCESSOS

Segundo Groover (2007), o planejamento de processos pode ser definido como sendo a atividade responsável pela determinação dos processos de fabricação e sua sequência para transformar a matéria-prima na peça acabada. Esse planejamento é realizado a partir das especificações da engenharia do produto e com base nas restrições que o sistema de manufatura oferece.

Shen *et al.* (2006) citam que o planejamento de processos é uma das atividades de maior detalhamento na fase de projeto, ocorrendo após a definição do projeto do produto. O planejamento de processos precisa definir como os produtos serão fabricados.

Deja e Siemiatkowski (2012) afirmam que a tarefa de planejamento de processos envolve interpretação e a conversão do projeto. A partir das especificações do produto irá culminar na fabricação do produto.

Atualmente, os sistemas produtivos estão diante de uma concorrência global e difícil. Cada vez mais se faz necessário atingir altas demandas, produtividades cada vez maiores e produtos com alto grau de qualidade. Além disso, deve-se atender a todas as normas. Existe hoje também uma demanda cada vez maior por produtos personalizados (DEJA; SIEMIATKOWSKI, 2012).

Percebe-se que o planejamento de processos torna-se uma atividade chave em qualquer indústria de manufatura. A função do planejamento de processos consiste em traduzir os requisitos do projeto em um roteiro que permitirá a fabricação do produto. Esse roteiro é chamado de plano (ou folha) de processo, o qual deve responder a algumas questões:

- Que maquinário será necessário para produzir?
- Quais operações serão realizadas em cada máquina?
- Qual a sequência das operações?
- Quais os parâmetros de fabricação?
- Qual o material utilizado?
- Quais serão os instrumentos usados para o controle?
- Qual será o tempo de execução?

Deja e Siemiatkowski (2012) citam ainda que, em muitos casos, o grande potencial operacional das máquinas não é totalmente utilizado na indústria, principalmente devido às imperfeições do planejamento de processos.

Segundo Fung *et al.* (2008), o plano de processo é a chave para a fabricação de qualquer produto. A qualidade dos planos de processo influencia diretamente o grau de complexidade do trabalho preparatório para a manufatura, a qualidade das peças e produtos fabricados, o grau de complexidade da programação da produção e os custos da produção. Portanto o planejamento do processo é fundamental para a manufatura.

2.3.1 Geração dos Planos de Processo

O plano de processo pode ser gerado manualmente pelo processista ou com o auxílio computacional, por meio do planejamento de processos auxiliado pelo computador (*Computer-Aided Process Planning – CAPP*). Nas duas últimas décadas, as tecnologias CAD/CAM foram amplamente desenvolvidas, visando automatizar e integrar as atividades no ciclo do projeto do produto e da manufatura (MOKHTAR; XU, 2011).

Por outro lado, nota-se que o planejamento de processos auxiliado pelo computador (CAPP) tem sido visto como o elo mais fraco na manufatura. Existe um entendimento comum de que o CAPP tem tido um impacto limitado sobre a prática industrial, tendo em vista todo o seu potencial (NONAKA *et al.*, 2013).

Contudo, Chang *et al.* (2005) descrevem que existem problemas associados à atividade de planejamento, como:

- O acúmulo de experiência do processista requer tempo;
- A experiência representa conhecimento aproximado e não exato;
- Experiência não é diretamente aplicável a novos processos e sistemas.

A dificuldade em se gerar os planos de processo não se dá apenas no contexto do processista. Percebe-se isto para ambas as tecnologias de planejamento (i.e. manual mediante processistas experientes, ou automática via sistemas CAPP) (DEJA; SIEMIATKOWSKI, 2012).

A limitação básica da abordagem tradicional na solução de problemas de planejamento de processos em qualquer empresa é deixá-la nas mãos de especialistas em produção, os quais usam sua experiência e conhecimento para gerar instruções para a fabricação de produtos. Diferentes processistas muitas vezes apresentam planos diferentes para o mesmo problema (PEDAGOPU; KUMAR, 2014).

Pedagopu e Kumar (2014) frisam que os sistemas CAPP devem ser eficientes, convertendo a especificação do projeto na forma compreensível para a máquina. A integração do projeto e fabricação, se não for feita corretamente, acarretará dificuldades a todo o processo de manufatura da empresa. O planejamento de processos auxiliado pelo computador (CAPP) pode ajudar a reduzir o tempo de planejamento, bem como aumentar a consistência e eficiência dos sistemas de manufatura.

Porém, como citam Xu *et al.* (2011), as principais atividades de planejamento do processo podem incluir a interpretação de dados de projeto, seleção de operações de usinagem, máquinas-ferramentas, ferramentas de corte, bem como o cálculo de custo e tempo de produção. Sem dúvida, este é um problema complexo de engenharia.

Segundo Chang *et al.* (2005), os recentes desenvolvimentos no planejamento de processos auxiliado por computador têm focado na eliminação da intervenção do processista no planejamento.

Em um sistema de planejamento auxiliado por computador (CAPP), pode-se aumentar a padronização das decisões, além de compartilhar informações de projeto, processo e manufatura. Com isso, pode-se obter alguns benefícios como cita Niebel *et al.* (1998):

- Reduzir a habilidade requerida ao processista;
- Reduzir o tempo de planejamento;
- Reduzir custos de planejamento;
- Criação de planos mais consistentes;

- Aumento da produtividade.

Conforme Xu *et al.* (2011), qualquer sistema CAPP deve possuir como características básicas:

- Um sistema CAPP pode receber os dados do projeto e gerar a saída, a qual pode ser alimentada em um software CAM e, posteriormente, um sistema CNC;
- Um sistema CAPP deve ser extensível, flexível e personalizável para que a empresa possa inserir novos processos e atualizar os existentes;
- Fornecer efetiva aquisição de conhecimento, bem como os meios para verificar a integridade e consistência dos planos gerados;
- Envolver usuários em algumas partes do processo de tomada de decisão;
- Interface de fácil utilização em apoio à interação efetiva, facilitando insumos, produção de resultados e relatórios, além de exibir os resultados graficamente.

Por fim, nota-se que a tarefa de elaborar planos de processo é árdua, seja manualmente ou ainda com o recurso de um sistema CAPP. Mas percebe-se a importância que a compilação desse conhecimento proporcionará à empresa.

2.4 PLANEJAMENTO DE PROCESSOS COM ALTERNATIVAS

Segundo Ferreira (1996), frequentemente existe mais de uma alternativa de plano de processo para a fabricação de uma peça. Colosimo *et al.* (2000) ressaltam que, normalmente, a elaboração dos planos de processo não considera recursos alternativos, apesar desse conceito estar presente na literatura há bastante tempo.

Assim, ao selecionar uma determinada máquina para executar uma operação, o processista seleciona apenas um tipo de máquina, mesmo que em alguns casos possa existir mais de uma opção. Tem-se como exemplo a simples operação de furação, a qual pode ser executada tanto em uma furadeira como em uma fresadora.

A princípio, por razões econômicas, o uso da furadeira aparenta ser mais vantajoso, mas se em algum momento a furadeira estiver ocupada, a fresadora poderia ser usada para efetuar o processo de furação. Porém, esta opção só seria levada em conta se um plano de processos com alternativas estiver sendo considerado.

Fung *et al.* (2008) resalta que os limites de capacidade de cada máquina e as operações que podem ser realizadas são bem definidas. No

entanto, algumas operações podem ser realizadas em mais de uma máquina, o que resulta no aspecto dinâmico do planejamento de processos.

Em um plano de processos com alternativas, recursos alternativos são previamente selecionados para realizar uma operação, como máquinas, ferramentas, dispositivos de fixação, etc. O objetivo de ter alternativas de recursos nos planos de processos é obter ganhos em flexibilidade e produtividade, além de ganhos na utilização dos recursos (MELLO, 2005).

Deja e Siemiatkowski (2010) citam que a disponibilidade do plano de processo com alternativas é apontada como o fator chave de integração entre o projeto do produto, o planejamento de processo e a programação da produção. Portanto, adotar alternativas em planos de processos pode ser visto como uma opção de se obter maior rapidez e eficiência nos sistemas de manufatura, uma vez que uma máquina ou recurso alternativo já foi previamente selecionado para o plano de processos (FERREIRA; WYSK, 2001a e 2001b).

Deja e Siemiatkowski (2012) retratam em sua pesquisa um sistema CAPP para a fabricação de peças em sistemas com capacidades de processamento definidas, envolvendo centros de usinagem multi-eixos. O método inclui a identificação de alternativas de processos e sequência de trabalho adequadas, baseando-se na modelagem de dados do projeto da peça em termos de características de usinagem. É proposto um algoritmo para a criação de tal uma rede e, assim, buscar a obtenção do plano de processo ideal do ponto de vista do seu desempenho operacional. São estabelecidas algumas restrições de processo, e a viabilidade da abordagem e o algoritmo são ilustrados por meio de um exemplo numérico aplicado uma situação real.

O sistema proposto por Deja e Siemiatkowski (2012) foi aplicado em peças prismáticas, mas pode ser aplicado em peças cilíndricas. Os resultados experimentais revelaram que o sistema possui capacidade de identificar o melhor plano de processo, considerando as condições de usinagem e as limitações, seja das máquinas ou das ferramentas.

2.4.1 Exemplo da aplicação de alternativas

Diversas concepções de diferentes plano de processos são geradas e então uma é a escolhida, resultando normalmente em um desbalanceamento do sistema produtivo, uma vez que, ao selecionar apenas uma concepção (menor tempo) seleciona-se os recursos mais

eficientes, sobrecarregando-os. Isso tem por consequência um aumento no estoque em processo e atrasos na produção (BRAHDWAJ; TIWARI, 2011).

Nota-se também que as concepções não escolhidas geram um desperdício de tempo para o processista, já que ao final só se escolhe uma opção. Porém, se o processista optasse por utilizar mais de uma das concepções geradas, através dos planos de processos com alternativas, seria proporcionada uma maior flexibilidade ao sistema (CAPEKI *et al.*, 2012).

Alguns autores mostram diferentes métodos para gerar alternativas e encontrar o melhor plano de processo de acordo com as restrições dos sistemas de manufatura.

Capek *et al.* (2012) propõem um algoritmo heurístico para resolver o problema considerando todas as combinações possíveis. O trabalho foi desenvolvido em uma empresa de chicotes automotivos.

Operações para produzir um feixe de fios podem ser realizadas de várias maneiras, usando máquinas inteiramente automatizadas, máquinas semiautomáticas ou manuais com equipamento especial.

Não são apenas as necessidades de recursos diferentes, mas os tempos de processamento, relações de precedência e também o número de atividades em cada plano de processo.

Bartak e Cepek (2008) tratam da geração de plano de processos com alternativas através de redes temporais. Apesar de serem mais utilizadas frequentemente para resolver problemas de planejamento, os autores citam que podem resolver problemas de programação também.

Deja e Siemiatkowski (2010) apresentam um modelo que utiliza os conceitos da inteligência artificial e, assim, gerar as possíveis alternativas e escolher a melhor de acordo com os parâmetros estabelecidos.

Um esquema conceitual para geração de planos de processos alternativos na forma de uma rede foi desenvolvido por aqueles autores. Esse esquema baseia-se na modelagem de dados do projeto em termos de características de usinagem. Um algoritmo é proposto para a criação de uma rede buscando o plano de processo ideal do ponto de vista do seu desempenho operacional, sob restrições do processo.

Nota-se portanto que a utilização de alternativas pode trazer benefícios, conforme os diversos autores apresentam.

Por exemplo, considerando que, se as concepções 1 e 2 de um determinado plano de processos utilizam o mesmo tipo de máquina (um torno), e as concepções 3 e 4 utilizam um centro de usinagem, o uso de

alternativas possibilita utilizar máquinas diferentes, de acordo com a concepção adotada, o que não seria possível se for adotado apenas uma concepção. Nesse caso, considerando várias concepções, poder-se-ia fabricar a peça em uma determinada máquina de acordo com as condições da fábrica em certos momentos.

Por exemplo, se uma máquina considerada na concepção 3 ou 4 estiver inoperante por algum motivo, e a previsão de reestabelecimento for maior do que a diferença entre os tempos de usinagem nas concepções 1 ou 2, a peça poderia ser produzida em uma dessas outras concepções que foram previamente selecionadas. Assim sendo, mesmo que o tempo de usinagem for maior em uma dessas concepções, pode ser mais vantajoso produzir a peça na concepção 1 ou 2 do que aguardar as concepções 3 ou 4 se reestabelecerem.

Observa-se que, mesmo não sendo tão eficiente, o recurso alternativo pode proporcionar benefícios se comparado à situação sem alternativas (FERREIRA; WYSK, 2001a).

Nesse contexto, o estudo do desempenho de alternativas em planos de processo pode definir alguns critérios, como estabelecer o limite para o qual o plano alternativo ainda é benéfico, e a partir de qual momento o plano alternativo acaba não sendo mais vantajoso para o sistema de manufatura.

Além disso, definiu-se quantas alternativas devem ser consideradas, e quais os benefícios obtidos por cada uma. Nos próximos itens serão apresentados alguns trabalhos da literatura que envolvem o uso de alternativas.

2.4.2 Alternativas em Sistemas de Manufatura

Um sistema de manufatura que compreende apenas um recurso pode ser visto como o sistema de manufatura mais simples possível. Ferreira e Wysk (2001a, 2001b) avaliaram a influência das alternativas em planos de processo para esse sistema.

Ferreira e Wysk (2001a) analisaram o sistema de manufatura com apenas uma máquina, sob a ótica da alternativa no plano de processo, considerando uma situação ideal, sem quebra ou falha de ferramenta. O objetivo de utilizar ferramentas alternativas foi de minimizar os tempos de *setup*. Os resultados apontaram uma pequena redução do tempo total de usinagem quando utilizadas as alternativas.

Em um segundo trabalho, Ferreira e Wysk (2001b) desenvolveram um estudo mais abrangente, porém seu intuito ainda foi

de reduzir os *setups*. Nesse trabalho eles utilizaram um modelo computacional e a influência de alguns fatores sobre a produtividade. O sistema ainda se baseou em apenas uma máquina. Eles conseguiram identificar ganhos de até 20% na produtividade em algumas condições de tamanho de lotes e variedade de peças.

Outro trabalho considerando apenas uma máquina foi desenvolvido por Mello e Ferreira (2004), em que os autores buscaram aperfeiçoar o modelo proposto por Ferreira e Wysk (2001b). Nesse caso considerou-se o número de peças fixo, e foram utilizadas distribuições probabilísticas para os tempos de fabricação. Os autores concluíram que a utilização de alternativas pode gerar tanto ganhos como perdas de produtividade. Os ganhos provêm da utilização da ferramenta já disponível no magazine da máquina, enquanto as perdas podem ocorrer em função do recurso alternativo não ter a mesma eficiência que a primeira opção.

Os autores consideram uma penalidade em relação à utilização da ferramenta alternativa, e tal penalidade, segundo Mello e Ferreira (2004), está associada à durabilidade da ferramenta e o tempo de usinagem da mesma.

Em outro trabalho, Mello (2005) aprimorou o sistema baseado em uma máquina, passando para um sistema com 4 máquinas e, ainda, considerou no modelo um sistema desbalanceado, acrescentando uma quinta máquina. Esse trabalho abordou a questão das alternativas tanto para a produtividade como para nível de utilização e estoque médio em processo. Atrou-se penalidades de 20% e 40% no tempo de usinagem quando fossem utilizadas as alternativas. Em suma, Mello (2005) também obteve ganhos com a utilização das alternativas, porém isto ocorreu somente no sistema desbalanceado.

Capek *et al.* (2012) estruturaram o problema da programação da produção mediante redes de Petri e, ainda, desenvolveram um modelo matemático para resolver os problemas de geração de planos de processo alternativos. Experimentos computacionais mostraram um bom desempenho do algoritmo proposto pelos autores.

No estudo de Usher (2003), o autor aponta os benefícios no desempenho do sistema ao utilizar alternativas. Ele mostra que o desempenho do sistema piora conforme o aumento do número de alternativas. Isso mostra que os processistas devem ser cuidadosos com relação ao tempo e recursos utilizados na geração de alternativas. Usher (2003) conclui que um pequeno número de boas alternativas é melhor que uma grande variedade de alternativas de desempenho limitado.

Usher (2003) mostrou pontos muito importantes no que tange a utilização de planos de processos com alternativas. Contudo, pode-se notar a falta de pontos importantes, como a falha de recursos e a influência que o tamanho dos lotes tem sobre o sistema. Também deixou de contemplar um importante critério como o da produtividade atingida com as alternativas.

Apesar de existirem diversos trabalhos acadêmicos envolvendo a utilização de planos de processos com alternativas, Colosimo *et al.* (2000) identificaram uma lacuna na aplicação deste conceito em chão de fábrica.

2.4.3 Programação e Sequenciamento da Produção

Segundo Li *et al.* (2012), em abordagens tradicionais planejamento e programação da produção são realizados sequencialmente, onde a programação é feita após o plano de processos ser gerado. No entanto, as funções dessas duas atividades são geralmente complementares. A abordagem tradicional tornou-se um obstáculo na tentativa de melhorar a produtividade e a capacidade de resposta de sistemas de manufatura.

Se as duas atividades pudessem ser integradas com maior intensidade, poderiam ser alcançados maior rendimento e produtividade de sistemas de manufatura. Assim, pesquisas visando a integração do planejamento de processos e a programação da produção (IPPS) são necessárias.

Guo *et al.* (2009) definem o problema do IPPS como sendo um conjunto de peças que deverão ser processadas em máquinas, sofrendo determinadas operações, devendo-se determinar uma sequência em que os requisitos de precedências entre as operações deverão ser satisfeitos (por exemplo, o mandrilamento deve ser executado depois da furação), ao mesmo tempo em que se otimiza um parâmetro, como por exemplo a redução do tempo de produção ou do estoque intermediário.

Li *et al.* (2012) criaram um método usando algoritmo genético de aprendizado ativo (ALGA) visando facilitar a integração e otimização das atividades de planejamento de processos e programação da produção. Os resultados mostraram que a abordagem proposta pelos autores é um método promissor e eficaz na investigação do problema IPPS.

2.4.4 Avaliação da Revisão da Literatura sobre Planejamento de Processos

Com base nos trabalhos encontrados na literatura sobre planejamento de processos, nota-se que os benefícios e estratégias na utilização de alternativas em planos de processo ainda deixam algumas lacunas. Isto é evidenciado por divergências encontradas e no desempenho que os autores mensuraram.

Pode-se citar, ainda, alguns possíveis motivos que levaram a divergências encontradas na literatura:

- Diferentes tipos de sistemas analisados;
- A geometria da peça ainda é pouco considerada na análise;
- Em muitos casos não são consideradas penalidades ao escolher o uso de alternativas;
- A possibilidade de acontecer falhas dos recursos;
- Existência de poucos estudos comprovados em aplicações nas indústrias.

2.5 SIMULAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE MANUFATURA

2.5.1 Simulação de Sistemas

Segundo Maria (1997), a simulação de um sistema é a execução de um modelo do sistema, entendido como uma representação da construção e funcionamento desse sistema.

O principal apelo ao uso da simulação é que questionamentos acerca dos sistemas sendo investigados podem ser respondidas sem que os mesmos sofram qualquer perturbação. A simulação computacional permite que tais estudos sejam realizados sobre sistemas que ainda não existem, tornando o desenvolvimento de projetos de sistemas mais eficientes. Dessa forma, não há necessidade que qualquer mudança física ocorra no sistema em questão.

Segundo Freitas Filho (2008), a simulação de um modelo permite entender a dinâmica de um sistema, assim como analisar e prever o efeito de mudanças que se introduzam no mesmo. É uma representação próxima da realidade, e será tanto mais real quanto mais características significativas do sistema seja capaz de representar.

Law e Kelton (2000) e Freitas Filho (2008) citam algumas vantagens e desvantagens com relação ao uso da simulação.

As vantagens são:

- Um modelo criado pode ser utilizado inúmeras vezes;
- Sistemas complexos do mundo real podem ser modelados;
- Permite avaliar os sistemas sob diferentes condições de operação;
- Não depende da disponibilidade do sistema real para a realização dos ensaios, nem incorre em custos para executar os experimentos;
- Pode conter simplificações com relação aos sistemas reais para que facilitem a modelagem e tornem mais fácil a compreensão dos parâmetros abordados, desde que os elementos desprezados não interajam com os parâmetros estudados em relação aos resultados a serem avaliados;
- Projetos alternativos de sistemas podem ser comparados via simulação;
- A simulação permite estudar os sistemas por um longo período de tempo em um espaço curto de tempo;
- Estudos via simulação ajudam a compreender como o sistema opera, melhor do que os indivíduos que pensam sobre seu funcionamento;
- A simulação é mais fácil de aplicar que os modelos analíticos. Por sua vez, modelos de simulação ainda devem ser muito simplificados para tornarem-se viáveis matematicamente;
- Análises de gargalos no sistema podem ser realizadas, indicando atrasos;
- Questões do tipo “o que aconteceria se” podem ser respondidas, o que se torna muito útil em novos projetos ou alterações de projetos existentes;
- Ideias podem ser obtidas sobre a interação das variáveis;
- Ideias podem ser obtidas sobre a influência das variáveis sobre o sistema;
- Podem ser quase tão detalhados como os sistemas reais, permitindo realizar ensaios num cenário muito similar ao real sem o ônus e o desgaste de ter de interferir na rotina dos sistemas reais. Permite também um estudo detalhado de todas as operações e características do sistema.

As desvantagens são as seguintes:

- A construção de modelos exige treinamento;
- A construção de modelos de simulação pode ser de elevado custo e consumir um elevado tempo de desenvolvimento;
- Resultados de simulação frequentemente são difíceis de serem interpretados, pois muitas vezes a maioria das saídas são variáveis

aleatórias, o que dificulta determinar se uma observação é resultado de uma relação ou apenas aleatório;

- Embora o acesso aos programas de simulação tenha aumentado, o custo desses programas ainda é relativamente alto;
- Nem sempre a variabilidade de um sistema é bem captada e modelada, podendo levar a resultados equivocados. Entretanto, algumas soluções, tais como introdução de geradores de números aleatórios, podem ajustar o modelo de forma a representar bem a variabilidade;
- A construção de modelos consome muito tempo. Tentativas de reduzir este tempo por via de simplificação do modelo podem levar a resultados insatisfatórios.

O uso da simulação computacional torna indispensável a utilização de um modelo para representar o sistema, pois só assim será possível traduzir a realidade numa linguagem de programação a ser interpretada pelo computador.

Para o desenvolvimento e conclusão do modelo de simulação, segundo Freitas Filho (2008), são necessárias quatro etapas: planejamento, modelagem, experimentação e conclusão. Portanto, a tarefa de criar o modelo não pode ser menosprezada, pois de nada adiantaria fazer uso dos melhores recursos computacionais se o modelo não representa o sistema

Na etapa da modelagem serão abordados os itens mais significativos que serão a tradução do modelo e a verificação e validação do modelo.

A tradução do modelo consiste em codificar o modelo na linguagem de simulação. É necessário conhecer, então, os conceitos associados aos sistemas e a linguagem de simulação.

Após concluir o modelo, se faz necessária a sua verificação e validação. A técnica de verificação procura garantir que o programa computacional esteja isento de erros de sintaxe e lógica. Já a técnica de validação tem como objetivo assegurar que o modelo tenha um comportamento semelhante ao do sistema modelado, permitindo a realização de inferências estatísticas válidas e confiáveis a partir do modelo.

Freitas Filho (2008) indica algumas técnicas de verificação e validação. As técnicas de verificação são:

- Uso de modelos determinísticos;
- Variações dos dados de entrada;
- Rotinas de rastreamento;

- Testes de continuidade;
- Execução de casos simplificados;
- Verificação de consistência;
- Independência de sementes geradoras de números aleatórios;
- Rotinas de verificação.

As técnicas de validação são as seguintes:

- Conhecimento e intuição de especialistas;
- Medições obtidas em sistemas reais;
- Resultados teóricos.

Sabe-se que experimentar com o sistema real é muito dispendioso, e Freitas Filho (2008) cita que pode-se reduzir o tempo necessário para a execução de um experimento. Law (2008) indica sete etapas para a validade de um experimento levado a cabo via simulação:

1. Formular o problema;
2. Coletar informações/dados;
3. Validar os dados em documento;
4. Programar o modelo;
5. Validar o modelo;
6. Desenvolver, executar e analisar os experimentos;
7. Documentar e apresentar resultados.

Reaes (2008) cita que o emprego da simulação para análise de sistemas é muito antigo. Porém, inicialmente a abordagem era por meio de algoritmos matemáticos como, por exemplo, a teoria das filas e o método de Monte Carlo. Com os avanços da informática ocorreu o desenvolvimento de diversas ferramentas de software aplicadas à simulação, dentre eles pode-se citar o software de simulação Arena.

2.6 PROJETO DE EXPERIMENTOS

O projeto de experimentos, segundo Sanchez (2008), é um método testador que emprega fatores (variáveis independentes), para testar o impacto nas saídas dos experimentos (variáveis resposta). As técnicas de projeto de experimentos são úteis para verificar se determinado fator influencia, ou não, a resposta de um sistema.

Na Figura 2.4, segundo Montgomery (2009), os fatores de controle são apresentados como as variáveis do processo cujo valor é possível controlar, enquanto os fatores não controláveis são as variáveis cujo valor não é possível controlar. A saída corresponde às variáveis resposta, que fornecem os resultados do sistema (MONTGOMERY, 2005).

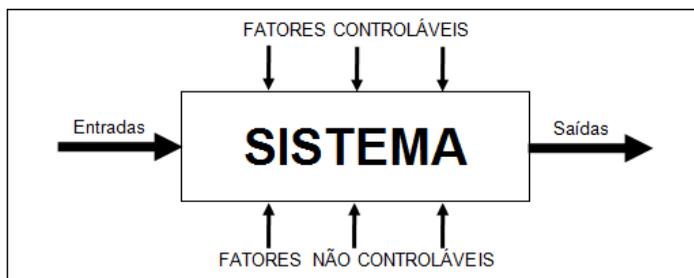


Figura 2.4 – Relação de variáveis que influenciam um sistema.

Fonte: Adaptado de Montgomery (2009)

A técnica consiste em testar uma sequência de experimentos nos quais são feitas alterações simultâneas em diversos fatores (segundo determinados níveis, tais como alto, médio e baixo), de modo que se possa avaliar os possíveis efeitos dessas alterações nas variáveis resposta envolvidas no processo (SANCHEZ, 2008).

Segundo Montgomery (2005), o projeto de experimentos possui os seguintes objetivos:

- Determinar quais os valores dos fatores de controle têm maior influência sobre a resposta;
- Determinar quais valores dos fatores de controle produzem respostas próximas do valor nominal;
- Determinar quais os valores dos fatores de controle que reduzem a variabilidade das respostas;
- Determinar quais os valores das variáveis de controle que reduzem a influência dos fatores não controláveis.

Portanto, conforme Freitas Filho (2008), como benefícios desta metodologia observa-se a compreensão com maior profundidade das relações entre os parâmetros do projeto (fatores analisados) e a variação de desempenho nos processos (variáveis resposta).

Segundo Reaes (2008), este método também permite avaliar os efeitos dos ruídos, que são interferências difíceis de avaliar em um processo como, por exemplo, a vibração de uma máquina ou a falta de

precisão de uma medida. Como os ruídos podem mascarar os resultados, a análise de variância (ANOVA) consegue identificar estatisticamente se o efeito dos fatores é significativo nas variações de desempenho do processo (variáveis resposta), e também se o nível dos ruídos em geral tem influência significativa nos resultados.

Vale ressaltar que, além da análise, o projeto de experimentos envolve também as etapas referentes à organização e condução de um experimento. Isto porque, em qualquer experimento, os resultados e conclusões a serem obtidos dependem da forma como os dados foram coletados (MONTGOMERY, 2005).

Montgomery (2009) cita algumas diretrizes para o planejamento de experimentos, que incluem:

1. Reconhecimento e relato do problema;
2. Escolha dos fatores e níveis;
3. Seleção das variáveis resposta;
4. Escolha do planejamento experimental;
5. Realização do experimento;
6. Análise dos dados;
7. Conclusões e recomendações.

Os passos 1 a 3 são chamados pré-experimentais, para o sucesso do experimento. É vital que esses passos sejam realizados tão bem quanto possível.

2.6.1 Projeto Fatorial Completo

Uma das estratégias de se coletar os dados para avaliar sua influência sobre os fatores é o projeto fatorial completo. De acordo com Montgomery (2005), nessa estratégia muitos fatores são alterados em conjunto, e não um a cada momento. Isso significa que todas as possíveis combinações serão testadas.

Utilizando o experimento com fatorial completo, considerando k fatores, com n níveis para cada fator, para testar todas as combinações de fatores serão necessários n^k experimentos. Por exemplo, em um experimento com 3 fatores (A, B e C), onde cada um deles possui três, dois e dois níveis cada respectivamente, ter-se-á 12 combinações (isto é, $3^1 \times 2^2$). Em cada um desses fatores a base da potência representa a quantidade de níveis, enquanto o expoente corresponde à quantidade de fatores em um determinado nível.

Em um experimento fatorial completo pode-se avaliar o efeito de cada nível dos fatores de controle sobre as diferentes variáveis resposta.

O efeito de um fator corresponde ao valor médio da variável de resposta em relação à variação produzida pela mudança do nível de fator. Assim, normalmente o efeito é chamado de efeito principal porque está relacionado aos primeiros fatores de interesse no experimento (MONTGOMERY, 2005).

Para visualizar esse efeito, os valores médios de cada nível são utilizados para gerar gráficos de efeito principal, e a Figura 2.5 mostra esse efeito. Quando o aumento no nível de um determinado fator corresponde a um aumento do efeito na variável resposta, o efeito é considerado positivo (Figura 2.5a). Por outro lado, quando o aumento do nível do fator corresponde a uma redução do efeito na variável resposta, tem-se o efeito negativo (Figura 2.5b). Pode-se obter também um efeito nulo, caso não seja verificada alteração na variável resposta (Figura 2.5c).

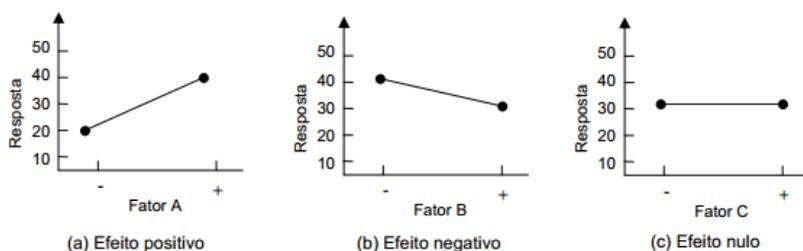


Figura 2.5 – Efeito na variável resposta através dos níveis dos fatores A,B e C
Fonte: Adaptado de Montgomery (2005)

Torna-se interesse analisar também o efeito da interação entre os fatores, que corresponde à diferença média do efeito entre os fatores. Ele é utilizado normalmente para ilustrar a interação entre os fatores em um experimento, onde os fatores A e B são testados em dois níveis: baixo e alto (Figura 2.6).

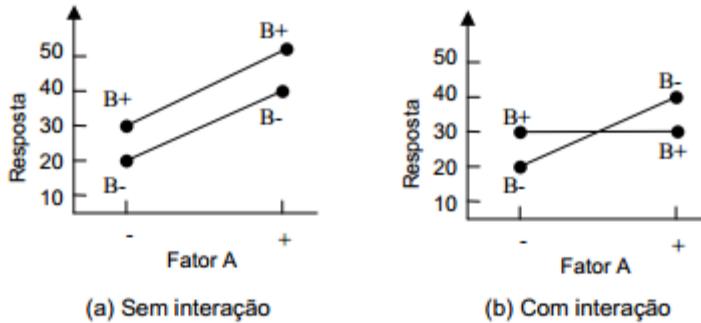


Figura 2.6 – Gráfico de interação das variáveis resposta para os fatores A e B
Fonte: Adaptado de Montgomery (2009)

Visualiza-se nos gráficos da Figura 2.6 que as linhas paralelas indicam que não existe interação entre os fatores, enquanto as linhas não paralelas (ou que se cruzam) indicam a existência de interação.

Segundo Freitas Filho (2008), a vantagem do projeto fatorial completo consiste em possibilitar que todas as combinações sejam analisadas, podendo-se encontrar o efeito de todos os fatores e entender suas interações.

Por outro lado, a principal desvantagem consiste no custo deste tipo de estudo em decorrência da necessidade de cada experimento ser repetido várias vezes. No entanto, em geral, essa desvantagem não é um empecilho tão significativo quando os experimentos são realizados no computador, via simulação computacional.

2.6.2 Projeto Fatorial 2^k

Montgomery (2005) cita que existem alguns casos especiais em um projeto fatorial completo. Um deles é onde existe k fatores, e cada fator possui apenas dois níveis: alto e baixo. Assim, a quantidade de experimentos em cada replicação é determinada substituindo os k fatores em $2^k = 2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2$.

2.6.3 ANOVA – Análise de Variância

Montgomery (2009) apresenta a análise de variância (ANOVA) como um método utilizado para comparar médias, quando há mais de dois níveis para um único fator. A ANOVA é aplicada preferencialmente em

experimentos que tenham sido replicados. A replicação se faz necessária para calcular o erro entre as diferentes medidas.

A análise da variância baseia-se nos seguintes testes de hipóteses:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_a$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \text{ para o menor par } (i, j)$$

Montgomery (2009) define que μ_i corresponde ao valor médio do efeito do tratamento i , para $i=1,2,\dots,a$. Quando a hipótese nula (H_0) for verdadeira, significa que a média dos efeitos para ambos os níveis é estatisticamente igual, portanto o efeito encontrado não é significativo. Porém, quando a hipótese nula é falsa, a média dos efeitos é estatisticamente diferente, então tem-se um efeito significativo entre os valores.

Essas análises levam em conta a probabilidade de aceitar uma hipótese falsa, ou rejeitar uma verdadeira. Essa probabilidade é expressa pelo valor atribuído ao nível de significância utilizado no teste ($1 - \alpha$).

O nível de significância deve ser observado porque a média dos efeitos pode ser afetada, tanto pelo efeito provocado pela alteração do nível de um fator como também ao efeito associado a um erro. Portanto, a análise da variância consiste na comparação do efeito do fator com o efeito do erro, considerando um determinado nível de significância.

A análise de variância é realizada a partir do cálculo de algumas variáveis utilizadas para medir a variabilidade nos resultados. Para isso tem-se a soma dos quadrados (SS – *Sum of Squares*) e a média quadrática (MS – *Mean Squares*). Essas variáveis são utilizadas no teste de hipótese, testando se a variabilidade não é maior que o erro, através da distribuição F. O valor do nível de significância para o experimento ($1-P$) corresponde ao menor nível de significância pelo qual se rejeita uma hipótese nula, sendo verdadeira. Em função disso, normalmente esse valor ($1-P$) é comparado ao valor do nível de significância adotado ($1-\alpha$), para verificar se um fator influencia ou não a resposta. Portanto, se o valor de ($1-P$) for maior que o valor de ($1-\alpha$), isto significa que o efeito do fator é significativo, e vice-versa.

2.7 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

No presente capítulo ilustrou-se uma revisão do estado da arte com relação aos principais temas que influenciaram a pesquisa. Em um

primeiro momento evidenciou-se os sistemas de manufatura e a forma com que eles são associados e seus tipos de processos.

A seguir abordou-se os tipos de leiautes e como eles se relacionam com os tipos de processo. Aprofundando as características principais dos leiautes: funcional, por produto, celular e posicional. Observou-se através do estado da arte acerca dos leiautes, que o leiaute celular virtual ainda pode ser considerado uma lacuna de conhecimento dentro dos estudos sobre leiaute.

Tendo em vista a falta de estudos, principalmente práticos associados a este tipo de configuração de chão de fábrica. Esse ponto se tornou crucial para o desenvolvimento da pesquisa, ilustrando certo ineditismo com o que foi proposto no trabalho.

Além disso apresentaram-se algumas aplicações desse conceito, bem como, os softwares utilizados para a pesquisa, além do projeto de experimentos e por fim ilustra-se as características do software Minitab que foi utilizado para o tratamento dos dados da pesquisa.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo apresenta-se a metodologia utilizada na elaboração desta dissertação, que se refere ao emprego da simulação de sistemas computacionais aliados à técnica de projeto de experimentos. Inicia-se apresentando o experimento realizado, destacando as *features* utilizadas, bem como os fatores de controle utilizados e as suas respectivas variáveis resposta.

Ilustra-se o modelo da simulação, o qual foi concebido com o propósito de possibilitar a variação de cada um dos fatores e níveis. Em seguida são mostrados detalhes do modelo relacionados à geração dos lotes de peças, ao planejamento de processo, às ordens de fabricação e aos três leiautes de sistemas de manufatura. No último item é discutido o procedimento que foi aplicado para combinar os fatores utilizados na realização da simulação propriamente dita e a obtenção dos resultados.

3.1 METODOLOGIA DA PESQUISA

Para Gil (2010), pesquisa é definida como o procedimento racional e sistemático que tem por objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos.

Existem diversas razões para se realizar uma pesquisa. Para Gil (2010) elas podem ser classificadas em dois grandes grupos: (a) as pesquisas com razões de ordem intelectual, onde decorrem do desejo de conhecer pela própria satisfação de conhecer, (b) as pesquisas com razões de ordem prática, onde decorrem do desejo de conhecer para fazer algo de maneira mais eficiente ou eficaz. A metodologia aplicada na presente pesquisa baseia-se em:

- a) Revisão da literatura: consiste em uma pesquisa bibliográfica visando a obtenção de fundamentos teóricos para o desenvolvimento da pesquisa. Para isto, utiliza-se livros, artigos científicos, páginas na internet, etc.
- b) Estudo da comparação dos leiautes, plano de processos com alternativas, simulação e projeto de experimentos: pretende-se simular situações diferentes para verificar se o leiaute celular virtual terá vantagem ou não sobre os leiautes funcional e celular tradicional de acordo com alguns parâmetros pré-estabelecidos, embasando a análise dos dados com conceitos estatísticos.

3.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

O projeto de experimentos consiste na definição dos fatores de controle e variáveis resposta. Como mencionado anteriormente, tal técnica é útil para determinar se um fator influencia ou não a resposta de um sistema.

Para que seja feita a análise são considerados três tipos de leiaute: o leiaute funcional, o leiaute celular tradicional e o leiaute celular virtual. Para todos os leiautes serão considerados tanto planos de processo com alternativas, bem como planos sem alternativas. O plano de processo com alternativas acarretará uma penalidade de 40% de acréscimo nos tempos de usinagem caso uma alternativa seja selecionada. Assim, pretende-se verificar quais os possíveis ganhos com as alternativas de plano de processo e como isso afeta cada tipo de leiaute. Em suma, os sistemas de manufatura serão:

- Leiaute Funcional:
 - *Plano de Processo COM Alternativas (penalidade 40%);*
 - *Plano de Processo SEM Alternativas.*
- Leiaute Celular tradicional:
 - *Plano de Processo COM Alternativas (penalidade 40%);*
 - *Plano de Processo SEM Alternativas.*
- Leiaute Celular Virtual:
 - *Plano de Processo COM Alternativas (penalidade 40%);*
 - *Plano de Processo SEM Alternativas.*

Visando reduzir erros inerentes à variabilidade do sistema, foram realizadas 10 simulações para cada combinação de fatores, ou seja, cada experimento foi replicado 10 vezes. Montgomery (2009) sugere que ao menos duas replicações sejam feitas e, com isso, determina-se a soma dos quadrados (SS) decorrente do erro. Também optou-se pelo projeto fatorial completo e, com isso, todas as combinações possíveis foram experimentadas.

Como apresentado, tem-se 8 fatores de controle, e como optou-se por apenas dois níveis em cada fator (alto e baixo), foram testados $2^8 = 256$ experimentos. Para cada experimento foram executadas 10 simulações, o que totalizou 2560 experimentos.

Esse conjunto de 2560 experimentos foi aplicado a cada um dos 3 leiautes diferentes (funcional, celular tradicional e celular virtual), isso totalizando 7680 experimentos.

Montgomery (2009) ressalta ainda que a escolha de apenas dois níveis para cada fator (alto e baixo) é importante quando procura-se saber quais fatores influenciam mais diretamente o experimento.

3.2.1 Software de Simulação

Definidos os fatores de controle que serão utilizados para a execução do experimento, é importante destacar o software de simulação e a metodologia empregada no processo de simulação desses 3 modelos.

No capítulo anterior se destacou o enorme benefício do uso da simulação na compreensão da dinâmica de um sistema mediante os modelos e os efeitos das mudanças introduzidas nos mesmos. Também foi visto que muitas etapas são necessárias para a confecção dos modelos a serem empregados na simulação.

Como os modelos dos cenários a serem avaliados foram inicialmente apresentados, considera-se que a etapa de planejamento já está realizada. Além disso, considera-se também que a primeira etapa da modelagem, que corresponde à coleta de dados, foi concluída, para a qual são utilizados os dados anteriormente apresentados pela literatura.

No referencial teórico se destacaram os grandes benefícios do emprego do planejamento de experimentos associado à simulação, em particular a possibilidade de se realizar inúmeros experimentos sem precisar dispor de instalações industriais dedicadas a este fim. Além disso, o alcance do experimento pode ser bastante amplo, bem como os resultados obtidos, e ainda a análise se dá de uma forma rápida a um custo reduzido.

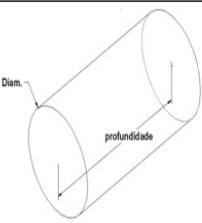
Com relação ao software de simulação, foi utilizado o Arena, por ser um dos melhores softwares desse tipo atualmente, além de ter-se uma licença com capacidade de uso pleno de todos os seus recursos.

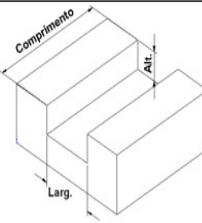
A seguir serão apresentados mais detalhadamente os fatores de controle e variáveis resposta utilizados nesta pesquisa.

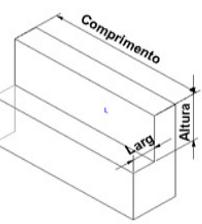
3.2.2 Features Utilizadas

Features são formas geométricas de interesse tanto para o projetista quanto para o processista, e dentre tais formas tem-se furos, rebaixos, canais, etc. Cada *feature* possui informações úteis para a fabricação das peças. Neste trabalho pretende-se utilizar quatro tipos de *features* para peças prismáticas: furo, rebaixo, canal e cavidade. E mais quatro para peças cilíndricas: recartilhar, sangrar, tornear e facear.

Na Figura 3.1 são apresentadas as *features* usadas para a formação das peças prismáticas, e na Figura 3.2 as *features* utilizadas na formação das peças cilíndricas.

Furo			
	cod.	diam.	prof.
	1	12	32
	2	13	40
	3	15	44
	4	18	55
5	20	60	

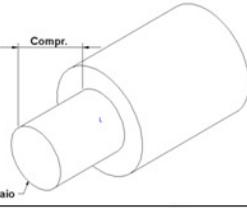
Canal				
	cod.	compr.	largura	prof.
	11	80	12	10
	12	85	14	12
	13	85	16	13
	14	90	18	15
	15	95	20	18

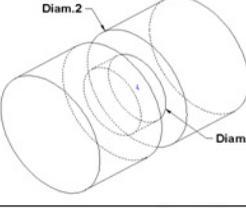
Rebaixo				
	cod.	compr.	largura	prof.
	6	80	14	15
	7	85	16	18
	8	90	18	18
	9	95	20	20
	10	100	25	25

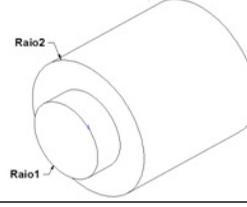
Cavidade					
	cod.	compr.	largura	prof.	raio conc.
	16	50	16	8	4
	17	55	20	10	5
	18	60	28	12	6
	19	60	32	12	7
	20	70	50	14	8

Figura 3.1 – Dimensões das *features* utilizadas na formação das peças prismáticas

Fonte: Autor.

Torneamento			
	cod.	raio	compr.
	21	10	35
	22	20	55
	23	30	65
	24	40	85
25	60	95	

Sangramento			
	cod.	diam.2	diam.1
	31	55	20
	32	65	30
	33	75	40
	34	85	50
	35	100	60

Faceamento			
	cod.	raio2	raio1
	26	40	10
	27	50	15
	28	60	20
	29	70	25
	30	80	30

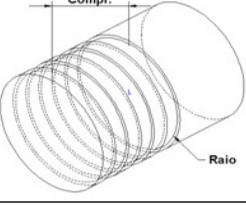
Recartilhamento			
	cod.	raio	compr.
	36	10	40
	37	20	60
	38	30	80
	39	40	90
	40	60	100

Figura 3.2 – Dimensões das *features* utilizadas na formação das peças cilíndricas

Fonte: Autor

3.2.3 Fatores de Controle

Fatores de controle são aqueles itens que terão seus valores modificados, e eles influenciam as variáveis resposta do sistema, cujo comportamento será avaliado. Para cada um dos fatores utilizados na análise deve-se estipular níveis, optando-se pelos níveis alto e baixo. Os fatores e seus respectivos níveis são representados resumidamente no quadro 3.1.

Quadro3.1 – Fatores de controle a serem utilizados no experimento

Fonte: Autor

Fator	Descrição	Nível	Valor
Features por peça	Quantidade de <i>features</i> por peça	Baixo	1 a 3 <i>features</i> por peça
		Alto	7 a 10 <i>features</i> por peça
Features Duplicadas	Quantidade de duplicações de uma mesma <i>feature</i> em cada peça	Baixo	1 a 3 <i>features</i>
		Alto	7 a 10 <i>features</i>
Tamanho do lote	Quantidade de peças contidas em cada lote	Baixo	10 a 50 peças
		Alto	200 a 500 peças
Tipo de demanda	Tipo de demanda ao qual o sistema será submetido	Baixo	Demanda aleatória
		Alto	Demanda projetada
Tipo de Plano	Plano de processos utilizado na simulação com ou sem alternativas	Baixo	Plano SEM Alternativas
		Alto	Plano COM Alternativas
Lotes Simulados	Quantidade total de Lotes Simulados em cada replicação	Baixo	50 lotes
		Alto	200 lotes
Tempo de Chegada	Tempo para a Chegada do próximo lote em relação ao anterior	Baixo	5% a 10% do tempo de processamento
		Alto	20% a 30% do tempo de processamento
Manutenção	Aplicação dos conceitos de manutenção nas máquinas	Baixo	Sem manutenção
		Alto	Com manutenção

Features por Peça

Corresponde à quantidade de *features* diferentes em cada peça. No nível baixo considera-se que uma peça possua de 1 a 3 *features*, já para o nível alto cada peça possuirá de 7 a 10 *features* diferentes. Nesse fator de controle todas as *features* consideradas serão diferentes.

Features duplicadas

Esse fator está relacionado à quantidade de *features* iguais que cada peça terá. O nível baixo corresponde a uma variação de 1 a 3 repetições da mesma *feature*, enquanto no nível alto tem-se de 7 a 10 *features*, representando que uma mesma peça poderá ter repetida uma mesma *feature* de 7 a 10 vezes.

Tanto o fator *features* por peça quanto o fator *features* duplicadas estão relacionados à complexidade que a peça projetada terá. Portanto, quanto mais alto o nível destes dois fatores, maior será a complexidade das peças.

Tamanho do lote

Este fator de controle refere-se à quantidade de peças que cada lote terá. Para o nível baixo tem-se de 10 a 50 peças, ou seja, no nível baixo os lotes gerados poderão variar sua quantidade entre 10 e 50 peças. No nível alto, a variação dos lotes fica entre 200 e 500 peças.

Tipo de demanda

Este fator de controle está relacionado ao tipo de demanda à qual o sistema está sujeito. Sabe-se hoje que as empresas precisam estar em constante evolução, necessitando se adaptar rapidamente às necessidades do mercado, bem como às mudanças rápidas que acontecem, principalmente no que tange à demanda de mercado (MACHADO; ANDRADE, 2013).

A visão sistêmica de uma organização não se limita somente a originar caixa, mas funcionar em longo prazo, gerar valor a sociedade e acionistas, objetivando crescimento contínuo (LINER; MEIER, 2006). Com isso em vista, optou-se também por verificar como o tipo de demanda pode refletir sobre as variáveis resposta propostas nesta pesquisa. Para tanto, utilizou-se como nível baixo uma demanda

totalmente aleatória, ou seja, a partir das 40 *features* listadas nas Figuras 3.1 e 3.2 o sistema gera demanda aleatória de peças em cada lote.

Já para o nível alto utilizou-se uma demanda projetada, ou seja, na demanda projetada o sistema gera os lotes de peça da seguinte maneira: 20% da demanda de lotes é de peças exclusivamente cilíndricas, 30% da demanda de lotes de peças exclusivamente prismáticas, e 50% dos lotes são compostos por peças que possuam em sua geometria partes cilíndricas e prismáticas.

Tipo de plano

O fator tipo de plano, por sua vez, caracteriza se o plano de processo gerado para a fabricação das peças possui alternativas ou não. Para o nível baixo, tem-se o plano de processos sem alternativas, o que conceitualmente pode ser visto como o plano de processos tradicional. Conforme já mencionado, neste tipo de plano apenas uma máquina é escolhida para executar cada tipo de operação.

Por outro lado, no nível alto tem-se plano de processos com alternativas e, nesse caso, foram consideradas previamente duas opções de máquinas para executar a mesma operação. Com isso, no plano de processos com alternativas existem duas opções de máquinas para a execução de uma mesma operação na peça. Segundo Usher (2003), preferencialmente devem ser utilizadas duas alternativas, pois quanto maior o número de alternativas, mais se estará utilizando recursos menos eficientes. Até porque, a utilização de duas alternativas pode dispensar a utilização de métodos complexos e de difícil implementação.

A maneira com que o sistema interpreta quando e como utilizará ou não a máquina alternativa está relacionada ao estoque em processo de cada máquina. Assim, o recurso definido como segunda opção para a execução de determinada operação só será selecionado quando a fila do primeiro recurso for maior do que a do segundo recurso. Com isso pretende-se privilegiar o recurso que tiver a menor carga de trabalho, reduzindo a sobrecarga sobre recursos gargalos. Outra vantagem é que no chão de fábrica não se torna tão complexa a visualização de qual recurso possui maior carga.

Lotes simulados

Este fator de controle está relacionado diretamente ao tempo de duração da simulação. Será este fator que determinará o tempo de

simulação do experimento. Dessa forma, quanto maior a quantidade de lotes simulados, maior o tempo necessário para produzi-los.

Freitas Filho (2008) cita que normalmente a simulação é realizada considerando apenas a fase em que o modelo se encontra em regime permanente, o qual é caracterizado por uma variabilidade menor das variáveis do modelo de simulação. Entretanto, a determinação do regime permanente em um modelo de simulação combinado com projeto de experimentos pode se tornar pouco viável, tendo em vista a quantidade de experimentos a ser realizada.

Para este fator foram definidos como nível baixo 50 lotes, enquanto que para o nível alto foram definidos 200 lotes. Dessa forma pretende-se avaliar o comportamento do sistema nesses dois contextos.

Tempo de Chegada entre os Lotes

O tempo de chegada entre um lote e outro representa um parâmetro muito importante na simulação de um sistema de manufatura. Este fator está diretamente atrelado à determinação da existência ou não de estoque em processo. Por exemplo, se o tempo que um lote leva para ser processado é maior do que o tempo para a chegada do lote seguinte à máquina, ocorrerão estoques em processo. Da mesma maneira, se o tempo que um lote leva para chegar até uma determinada máquina for maior do que o tempo para processar o lote que já está na máquina, ocorrerá ociosidade do recurso.

Desta forma, para este experimento considerou-se os seguintes valores: como nível baixo para o fator tempo de chegada entre os lotes considerou-se de 5% a 10% do tempo total de processamento do lote. Por exemplo, se um lote entra no sistema e leva 90 minutos para ser processado, o próximo lote pode entrar no sistema de 4,5 minutos a 9 minutos depois que o primeiro entrou e, com isso, gerará uma fila no recurso. Da mesma forma acontecerá quando houver o nível alto, que foi estimado de 20% a 30% do tempo de processamento.

Manutenção dos Equipamentos

Deve-se considerar que as atividades de manutenção têm como objetivo básico manter e melhorar a regularidade da operação de um sistema produtivo, impactando diretamente a disponibilidade e a segurança dos equipamentos. Partindo do pressuposto de que é praticamente inviável se ter um equipamento que não apresente falhas, é

necessário conhecer o comportamento das falhas dos equipamentos, a fim de se planejar e gerenciar um programa de manutenção adequado às especificidades de cada empresa (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Este é um fator de controle de muita importância, uma vez que as empresas precisam aperfeiçoar cada vez mais os seus processos. Desperdiçar tempo de produção com paradas de equipamentos não podem mais ser admitidos (MACHADO; ANDRADE, 2013). Para tanto se optou nesta pesquisa em utilizar a manutenção como um fator de controle, através do qual o nível baixo foi considerado como um sistema sem manutenção, suscetível a falhas sem qualquer aviso.

Já no nível alto deste fator de controle, tratou-se de um sistema com um programa de manutenção, sem falhas, pois as manutenções são programadas e não afetam a disponibilidade dos equipamentos.

3.2.4 Variáveis Resposta

As variáveis resposta utilizadas são:

- Produtividade (peças/h): seu cálculo é realizado considerando o total de peças produzidas (Q) em um determinado intervalo de tempo (Δt). A quantidade total de peças é o somatório das peças produzidas em cada lote (q), considerando um determinado número de lotes (n);

$$P = \frac{Q}{\Delta t}$$

$$Q = \sum_{i=0}^n q$$

- Estoque médio em processo (peças): é calculado com base na expressão apresentada por Law e Kelton (2000), a qual relaciona a somatória de tempo de espera (Δte) para todos os lotes simulados (n), considerando a quantidade total de peças em cada lote (q) em um intervalo de tempo (Δt).

$$E = \frac{\sum_{i=0}^n (\Delta te \cdot q)}{\Delta t}$$

Essa variável permite efetuar uma análise em conjunto com a produtividade. Entende-se que não é interessante obter altos índices de produtividade se os índices de estoque em processo também estão elevados.

- Utilização do Recurso (%): é calculado pela relação entre o intervalo de tempo de utilização do recurso (Δtu) e o intervalo de tempo disponível desse mesmo recurso (Δt).

$$U = \frac{\Delta tu}{\Delta t}$$

- Tempo final (horas): Esta variável resposta é coletada diretamente do software Arena, dado que é disponibilizada através do relatório. Ele representa o tempo total da simulação, sendo o tempo desde o momento em que se inicia até o final da simulação. Como cada experimento foi replicado 10 vezes, então esse tempo é uma média das 10 replicações;
- Tempo total de espera (horas): da mesma forma, essa variável também é calculada pelo software Arena, e representa a soma do tempo que cada lote ficou esperando para ser processado. Representa o tempo, por exemplo, que o lote ficou na fila, esperando para ser fabricado, e também o tempo que o lote ficou esperando para ser transportado entre os recursos;
- Lead Time (horas): Esse dado da variável resposta é colhido diretamente no software Arena. Ele representa o tempo que uma peça leva para mover-se ao longo de todo um processo ou um fluxo de valor. Sendo contabilizados tempos de espera, tempos de transporte e quaisquer outros tempos que não sejam ligados diretamente ao processamento e fabricação do lote.

3.2.5 Software Minitab para o projeto de experimentos

Conforme citado anteriormente, para se verificar se a variação do nível de qualquer fator de controle afeta com significância as variáveis resposta, deve-se submeter os resultados a uma análise estatística. No caso, será utilizada a análise de variância.

O cálculo da ANOVA para experimentos que envolvem muitos fatores é bastante trabalhoso e, nesse caso, os gráficos podem se tornar imprescindíveis para analisar e determinar se há interação entre os fatores.

Por esses motivos o emprego de uma ferramenta estatística neste trabalho é essencial, e escolheu-se o software Minitab para esta tarefa. Entre os benefícios desta ferramenta tem-se os seguintes:

- Cálculo automático dos graus de liberdade, erros, variâncias, somas dos quadrados;
- Geração automática dos gráficos de efeitos principais (variáveis resposta) em função de cada um dos fatores de controle testados ou da combinação deles;
- Permite trabalhar com uma gama elevada de fatores;
- Permite trabalhar com um número elevado de níveis para cada fator;
- Permite realizar a experimentação fatorial completa;
- Permite o planejamento de experimento com um número elevado de replicações para cada experimento;
- Capacidade de importar e exportar os dados em formato de planilhas de cálculo.

3.3 MODELO DE SIMULAÇÃO

Nesta pesquisa pretende-se apresentar um modelo de simulação que dará continuidade ao que foi proposto por Mello (2005) e Reaes (2008), com algumas considerações adicionais.

Mello (2005) apresentou as vantagens decorrentes da utilização de alternativas nos planos de processo, tendo utilizado um modelo com 4 máquinas e outro modelo com 5 máquinas, limitando-se a apenas 3 variáveis resposta. Além disso, ele deixou de tratar a questão da disposição física das máquinas no chão de fábrica, o que pode se tornar extremamente impactante nos resultados encontrados.

Como principais resultados, Mello (2005) conseguiu mostrar que os fatores tempo de chegada, *features* duplicadas, *features* por peça, lotes simulados, quantidade do lote e tipo de plano foram os que mais influenciaram a produtividade, estoque em processo e utilização dos recursos.

Mello (2005) vislumbrou que o fator tipo de plano é um fator que ainda pode ser muito trabalhado no chão de fábrica, enquanto fatores como *features* duplicadas e *features* por peça estão relacionados ao cliente, e sua variação é, portanto, difícil de controlar.

Já Reaes (2008) conduziu uma pesquisa mais complexa no que tange simulação. Reaes (2008) comparou 3 tipos de leiaute, o leiaute funcional, o leiaute celular tradicional e o leiaute celular virtual, baseando uma parte significativa da sua pesquisa no que foi proposto por Suresh e Slomp (2005).

Reaes (2008) priorizou a utilização dos recursos disponíveis e a busca pela redução do tempo de fluxo. Aplicou, também, regras de prioridade para o sequenciamento da produção.

Reaes (2008) teve como fatores de controle o tipo de leiaute, o nível de redução de *setup*, o tamanho do lote de peças, a flexibilização de operadores, a variabilidade da demanda e a variação entre o tempo de chegada das peças. Já para as variáveis resposta Reaes (2008) considerou o tempo médio de fluxo, tempo médio de fila, ocupação dos operadores e quantidade de peças produzidas.

Com relação aos sistemas modelados, Reaes (2008) utilizou mais máquinas do que Mello (2005). Foram 31 máquinas e 21 operadores, e 50 tipos diferentes de peças.

Para Reaes (2008) a conclusão mais importante foi comprovar que o leiaute celular virtual teve seu melhor desempenho em um cenário intermediário entre os leiautes do tipo funcional e celular tradicional. Concluiu que o leiaute celular virtual teve desempenho superior se comparado ao celular para lotes menores de peças, e pior para níveis maiores de redução de *setup*.

Esta pesquisa apresenta 3 modelos distintos de leiautes de manufatura: um para o leiaute funcional, outro para o leiaute celular tradicional e outro para o leiaute celular virtual.

Com relação ao modelo de simulação, divide-se esta tarefa em duas etapas, sendo que a primeira etapa corresponde à geração das ordens de produção dos lotes das peças. Nesta etapa são realizadas as seguintes atividades: geração das *features* das peças, definição da quantidade de *features* duplicadas, definição do tamanho do lote, definição do tipo de demanda, geração da sequência de usinagem e cálculo dos tempos de usinagem. Esses dados são armazenados em uma planilha eletrônica para servirem de entrada de dados para a posterior simulação no software Arena.

Na segunda etapa é efetuada a simulação do sistema, e os resultados obtidos também são armazenados em uma planilha eletrônica para posteriormente efetuar-se a análise estatística. O fluxograma apresentado na Figura 3.3 ilustra essas etapas.

As tarefas desempenhadas em cada programa são demarcadas pelas linhas que delimitam a primeira etapa, a segunda etapa e o sistema de manufatura.

Nos próximos itens serão apresentados os principais elementos de cada etapa da Figura 3.3.

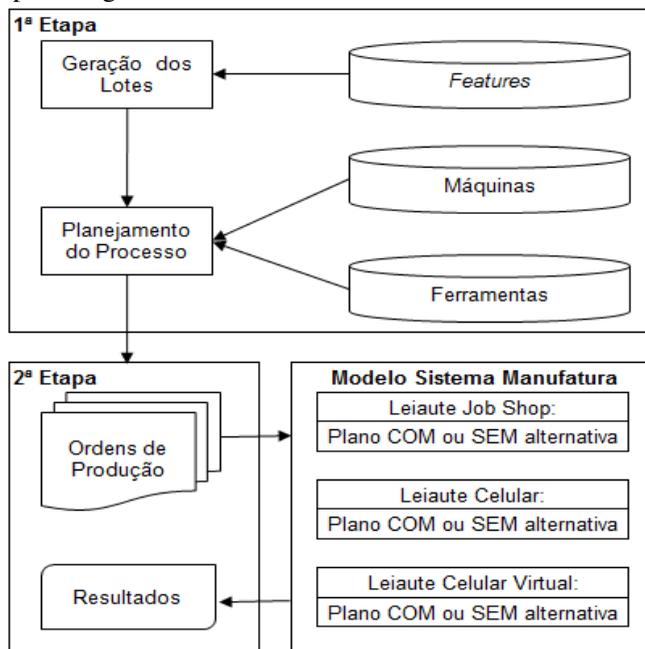


Figura 3.3 – Estrutura do Modelo de Simulação

Fonte: Autor

3.3.1 Geração dos Lotes de Peças

Nesta etapa são definidas as características dos lotes que compõem a ordem de produção, tais como as *features* que irão formar as peças e a quantidade de peças em cada lote.

A quantidade de *features* para cada peça é definida aleatoriamente dentro de cada intervalo: de 1 a 3 *features* para o nível baixo, e de 7 a 10 *features* para o nível alto, conforme as *features* presentes no banco de dados de *features* (Figuras 3.1 e 3.2).

A quantidade de *features* duplicadas também segue a mesma lógica, variando de acordo com os valores dos intervalos pré-estabelecidos para o fator de controle.

A quantidade de peças que cada lote é determinada de forma aleatória dentro dos intervalos propostos para o fator de controle. É importante ressaltar que cada lote é composto por apenas um tipo de peça.

Nesta etapa também é gerada a quantidade de lotes, sendo gerados 50 ou 200 lotes de peças.

Nesta etapa ainda é observado o tipo de demanda, ou seja, se tem-se uma demanda aleatória ou uma demanda controlada para aquele determinado lote de peças. Essa variação está relacionada ao nível escolhido, se baixo ou alto.

Ao fim desta etapa de geração dos lotes de peças sabe-se quais as *features* que formam as peças, a quantidade de *features* duplicadas em cada tipo de peça, bem como a quantidade de peças que cada lote terá, e também a quantidade de lotes que serão gerados. Todos esses fatores estarão atrelados ao tipo de demanda aplicada.

A próxima etapa consiste em determinar a sequência de fabricação bem como o tempo de fabricação de cada lote.

3.3.2 Planejamento de Processo

O planejamento de processos é executado utilizando informações que estão cadastradas nos bancos de dados de ferramentas e máquinas para cada uma das *features* geradas.

O banco de dados de ferramentas relaciona as *features* e máquinas necessárias para sua fabricação. No caso do banco de dados de máquinas, foram definidas duas máquinas para a fabricação de cada *feature*, sendo que apenas uma foi considerada no caso do plano de processos sem alternativas.

Quando o plano de processos possuir alternativas são consideradas as duas máquinas e seus respectivos tempos de processamento. Cada plano tem a sequência das máquinas utilizadas para a execução de cada *feature*, bem como o seu respectivo tempo.

A sequência de fabricação do lote de peças é obtida relacionando a *feature* gerada com a respectiva máquina, enquanto os tempos de fabricação são calculados com base nas informações do banco de dados de ferramentas.

As informações cadastradas para cada ferramenta são as suas dimensões e as condições de corte como: avanço, profundidade de corte e velocidade de corte.

O Quadro 3.2 apresenta os tempos de usinagem calculados para cada uma das 40 *features* consideradas no modelo. Assumiu-se nesta

pesquisa que as máquinas disponíveis têm capacidade suficiente para fornecer a potência de corte exigida para as ferramentas.

As equações usadas no cálculo dos tempos de usinagem para as *features* prismáticas (furos, rebaixos, canais e cavidades) foram obtidas do trabalho de Ferreira e Wysk (2001a). Para as *features* cilíndricas (tornear, facear, recartilhar e sangrar) foram utilizadas as equações propostas por Álvares (2005).

Quadro 3.2 – Dados de tempos de usinagem para cada *feature*

Fonte: Autor

feature nº	Tempo (min)	Features	feature nº	Tempo (min)	Features
1	0,241274316	Furo	21	0,251327412	Recartilhar
2	0,326725636	Furo	22	0,753982237	Recartilhar
3	0,41469023	Furo	23	1,507964474	Recartilhar
4	0,622035345	Furo	24	2,261946711	Recartilhar
5	0,753982237	Furo	25	3,769911184	Recartilhar
6	2,226672688	Rebaixo	26	0,41887902	Tornear
7	2,746334631	Rebaixo	27	1,316476922	Tornear
8	2,90183953	Rebaixo	28	2,333754543	Tornear
9	3,444728787	Rebaixo	29	4,069110485	Tornear
10	4,210224073	Rebaixo	30	6,821744048	Tornear
11	0,832998052	Canal	31	0,897597901	Facear
12	1,09479744	Canal	32	1,361356817	Facear
13	1,332796883	Canal	33	1,914875522	Facear
14	1,378589181	Canal	34	2,558154018	Facear
15	1,670213816	Canal	35	3,291192304	Facear
16	1,790575256	Cavidade	36	0,515417545	Sangrar
17	2,064659863	Cavidade	37	0,652862223	Sangrar
18	2,674408561	Cavidade	38	0,790306902	Sangrar
19	2,740812469	Cavidade	39	0,927751581	Sangrar
20	3,367707826	Cavidade	40	1,256637061	Sangrar

3.3.3 Ordens de Fabricação

Até aqui ilustrou-se como o modelo se comporta lote a lote, mas para cada ordem de fabricação são gerados vários lotes. A quantidade de lotes é um fator de controle, ou seja, cada ordem de fabricação pode ter 50 ou 200 lotes, de acordo com o nível estabelecido.

Para facilitar a posterior utilização, cada ordem de fabricação foi armazenada como um arquivo no formato de planilha de dados. Cada ordem de fabricação reúne as seguintes informações: número do lote, quantidade de lotes, *features* por peça, quantidade de *features* duplicadas, quantidade de peças em cada lote, sequência de usinagem para a primeira opção de máquina, sequência de usinagem para a segunda opção de máquina, e os respectivos tempos de usinagem para as duas sequências. Todas essas informações foram influenciadas pelo fator de tipo de demanda.

Posteriormente, cada arquivo de ordem de fabricação é lido pelo modelo de simulação de cada tipo de leiaute para, assim, obter-se as variáveis resposta conforme o modelo ilustrado na Figura 3.3

3.3.4 Modelagem do Sistema de Manufatura

Três leiautes diferentes foram modelados para avaliar as variáveis resposta de acordo com os fatores de controle. Modelou-se no software Arena um sistema para o leiaute funcional, outro para o leiaute celular tradicional e um terceiro para o leiaute celular virtual. Cada modelo contém a mesma quantidade de máquinas, as quais conseguem executar determinadas *features* cada uma. Cada sistema contém 10 máquinas, sendo 2 furadeiras, 2 fresadoras convencionais, 2 fresadoras CNC, 2 tornos convencionais e 2 tornos CNC. Além disso, 8 operadores e 3 abastecedores.

No total todos os modelos têm 21 recursos. Com relação aos operadores, alguns deles são dedicados a dois recursos diferentes, enquanto outros se dedicam a apenas um tipo de recurso.

Os abastecedores são responsáveis por transportar os lotes de peças desde a entrada de cada sistema de manufatura, transportando-o até cada máquina e por fim entregando-o na expedição (saída) de cada sistema. O quadro 3.3 apresenta os 5 tipos diferentes de máquinas e as respectivas *features* que cada máquina consegue executar.

Quadro 3.3 – Tipos de máquina e suas operações

Fonte: Autor

Máq.	Operação	Plano de Processo SEM Alternativa	Plano de Processo COM Alternativa
1	Furadeira	Furo	Furo
2	Fresadora	Rebaixo, Canal	Furo, Rebaixo, Canal e Cavidade
3	Fres. CNC	Cavidade	Furo, Rebaixo, Canal e Cavidade
4	Torno	Recartilhar e Sangrar	Tornear, Facear, Sangrar e Recartilhar
5	Torno CNC	Tornear e Facear	Tornear, Facear, Sangrar e Recartilhar

Sistema de Manufatura – Leiaute Funcional

O sistema de manufatura funcional foi concebido através de seu conceito mais essencial. Conforme mencionado no capítulo 2, os recursos semelhantes ficam dispostos em departamentos. Então tem-se o departamento das fresadoras, departamento das furadeiras, departamento das fresadoras CNC, departamento dos tornos e, por fim, o departamento dos tornos CNC.

Nesse sistema, conforme ilustrado na Figura 3.4, são disponibilizados um operador para cada fresadora, tornos convencionais e tornos CNC. Já para a fresadora CNC e furadeira tem-se o mesmo operador atuando nesses dois equipamentos.

De um modo geral, o lote de peças entra no sistema e, de acordo com seu plano de processos, vai sendo conduzido de um departamento ao outro. Se o departamento estiver sendo utilizado o lote fica em espera até a liberação de algum recurso do departamento.

O abastecedor integra o sistema de movimentação, ou seja, são os 3 recursos de abastecedores que transportam os lotes de peças de um departamento ao outro, do início ao fim da fabricação de cada lote de peças.

O abastecedor pode transitar entre todos os departamentos, ou seja, assim que se faz necessário um abastecedor, aquele que estiver disponível irá atender a necessidade do sistema.

Sistema de Manufatura – Leiaute Celular Tradicional

No sistema de manufatura concebido através do leiaute celular tradicional, também utilizou-se o mesmo número de recursos antes apresentados. Partindo do conceito estabelecido no capítulo 2 para leiaute celular tradicional, o qual ocorre um arranjo específico de recursos para atender determinadas demandas, modelou-se o sistema proposto na pesquisa.

No modelo que se apresenta nesta dissertação, estabeleceu-se as células através do critério do tipo de peça de cada lote. Ou seja, conforme ilustrado anteriormente, as peças se baseiam em 40 *features* diferentes, as quais estão basicamente divididas em dois grupos: *features* para peças cilíndricas e *features* para peças prismáticas.

Além disso, um dos fatores de controle é o tipo de demanda, ou seja, se a demanda será totalmente aleatória, ou se será controlada.

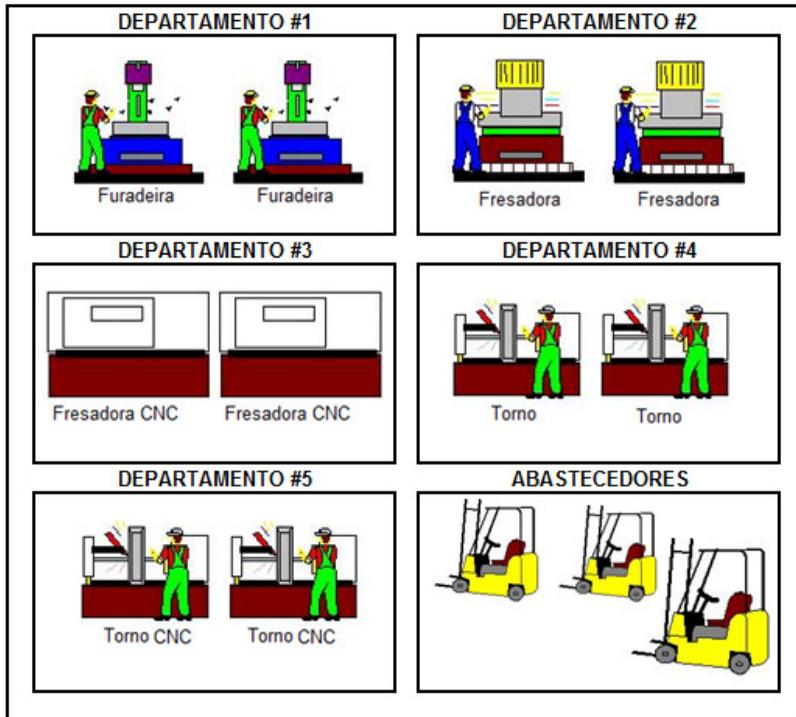


Figura 3.4 – Modelo Funcional

Fonte: Autor

Assim, estabeleceu-se no leiaute celular tradicional 3 tipos diferentes de células. A primeira célula fabrica apenas peças prismáticas, ou seja, é composta por 1 furadeira, 1 fresadora e 1 fresadora CNC. Dessa forma, os lotes de peças formados por peças estritamente prismáticas (*features* 1 a 20, conforme Figura 3.1) será atendido nesta célula.

Uma segunda célula foi estabelecida para atender peças que contenham tanto *features* prismáticas quanto *features* cilíndricas. Portanto, essa célula é composta por 1 furadeira, 1 fresadora, 1 fresadora convencional, 1 torno e 1 torno CNC.

A terceira célula destina-se a atender peças que contenham apenas o formato cilíndrico e, para tanto, é composta por 1 torno e 1 torno CNC.

Cada célula conta com a presença de 1 abastecedor, o qual é responsável por coletar a matéria-prima no início do processo e expedir o produto acabado para a saída de cada sistema. Esse abastecedor é

dedicado, ou seja, ele não interage e não muda de célula durante a execução do modelo. A Figura 3.5 ilustra esse segundo sistema de manufatura.

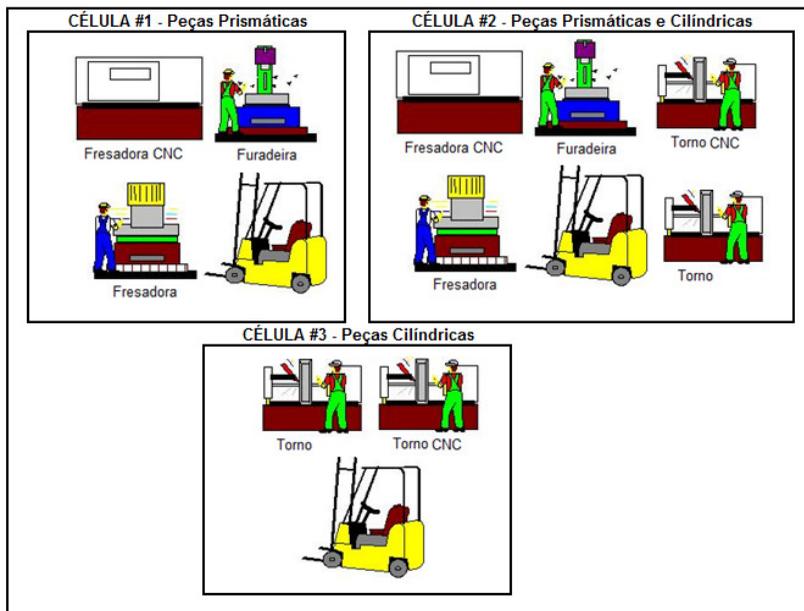


Figura 3.5 – Modelo celular tradicional

Fonte: Autor

Sistema de Manufatura – Leiaute Celular Virtual

O terceiro sistema de manufatura aqui apresentado é o sistema que representa o leiaute celular virtual, conforme apresentado no capítulo 2. Neste trabalho este sistema tem a mesma distribuição física do leiaute funcional, ou seja, as máquinas ficam distribuídas em departamentos, e o que muda é a lógica do sistema.

Ao chegar um determinado lote de peças, o sistema verifica todos os recursos que serão necessários para fabricar aquele lote. Depois, todos os recursos que serão necessários para a fabricação do lote ficam reservados, os quais compõem uma célula virtual. Assim que os recursos não são mais necessários para a fabricação daquele lote eles são liberados, podendo ser utilizados por outro lote de peças.

Com relação aos abastecedores, eles têm total liberdade de transitar entre os departamentos, desde a entrada da matéria-prima no sistema até a saída dos lotes de produtos acabados.

Penalidade

Um dos fatores de controle utilizados nesta pesquisa relaciona-se ao plano de processo, ou seja, se será utilizado plano de processo com ou sem alternativas. No caso de um plano de processos com alternativas, define-se uma segunda opção de recurso para executar determinada operação. Porém, este recurso não é o recurso ideal para executar a referida operação e, por isso, estabeleceu-se uma penalidade de 40% relacionada ao tempo de usinagem quando se utiliza o recurso alternativo.

Para cada *feature* calculou-se um determinado tempo de operação considerando a 1ª opção de recurso para a execução dessa operação. Assim, o tempo para a 2ª opção de recurso será 40% maior que o da primeira opção. Por exemplo, considerando que o tempo de usinagem de determinada operação seja de 90 minutos, assumindo a sua fabricação em um recurso de 1ª opção, se o lote vier a ser fabricado utilizando um recurso alternativo, o tempo de usinagem será igual a 126 minutos ($90 * 1,4$). Pode-se interpretar também que o recurso alternativo é 40% menos eficiente que o recurso principal.

3.3.5 Valores adotados aos sistemas de manufatura

Algumas variáveis referentes ao processo de simulação tiveram seus valores adotados conforme estabelecido abaixo.

Tempos de transporte

Para cada modelo de simulação citado foi necessário estabelecer alguns parâmetros no que tange os tempos de transporte. Para o leiaute funcional e celular virtual estabeleceu-se uma distribuição uniforme com valor de 30 a 60 minutos para o transporte entre os departamentos, e uma distribuição uniforme de 3 a 6 minutos para o lote iniciar o processamento no recurso selecionado.

Já para o leiaute celular tradicional estabeleceu-se uma distribuição uniforme de 3 a 6 minutos para a entrada na célula, e também uma distribuição uniforme de 3 a 6 minutos para o início da execução da operação em cada recurso. O quadro 3.4 ilustra esses dados.

Quadro 3.4 – Tempos de transporte

Fonte: Autor

	Leiaute job shop/celular virtual	Leiaute celular tradicional
Tempos Entrada do Sistema	UNIF (30,60)	UNIF (3,6)
Tempo Entrada Máquina	UNIF (3,6)	UNIF (3,6)

Além dos tempos de transporte mencionados, também foram estabelecidas as distâncias entre cada recurso e a velocidade com que os abastecedores efetuavam o transporte. A distância entre os equipamentos foi considerada igual a 5 metros, enquanto a distância da entrada do sistema até os equipamentos é de 10 metros, e a distância entre os equipamentos e a saída do sistema é igual a 20 metros.

A velocidade com que o abastecedor faz o transporte ficou estabelecida em 5 metros por minuto para todos os 3 modelos. O quadro 3.5 resume estes dados.

Quadro 3.5 – Distâncias percorridas

Fonte: Autor

Ponto A	Ponto B	distância
máquina	máquina	5 m
entrada	máquina	10 m
máquina	saída	20 m

Tempos de setup

Os valores de tempos de *setup* foram considerados nos 3 modelos e, por se tratar dos mesmos recursos, adotou-se os mesmos valores para os modelos. Os valores adotados foram retirados de Hamed *et al* (2012a). O quadro 3.6 ilustra os valores adotados para tempos de *setup*.

Quadro 3.6 – Tempos de *setup*

Fonte: Autor

Recurso	Tempo Setup (min)
Furadeira	20
Fresadora	35
Fresadora CNC	35
Torno	20
Torno CNC	35

Tempos de troca de ferramentas

Os valores atribuídos para a troca de ferramentas foram estabelecidos de acordo com estudos apresentados na literatura e dados retirados dos catálogos dos fabricantes.

Para a troca de ferramentas das furadeiras, fresadoras e fresadoras CNC estabeleceu-se como intervalo uma distribuição de Poisson de valor médio igual a 60, enquanto o tempo de troca corresponde a uma distribuição normal de 5 a 10 minutos (MELLO, 2005).

A troca de ferramentas dos tornos e tornos CNC corresponde a uma distribuição uniforme de 5 a 10 minutos para o intervalo de troca, e uma distribuição de Erlang com média 2 para o tempo de duração da troca (AL-AOMAR; AL-OKAILY, 2006).

Tempos de falha dos recursos

Como já mencionado, os tempos de manutenção foram estabelecidos como um fator de controle nesta pesquisa e, para isto, estabeleceu-se dois níveis para a manutenção: baixo e alto.

Se o sistema possuir um programa de manutenção, as máquinas não sofrerão com as falhas, ou seja, se há um plano de manutenção as máquinas não falharão. Isto é, as máquinas estarão sempre disponíveis, e este foi considerado o nível alto.

Por outro lado, se o sistema não possuir um plano específico de manutenção ele estará sujeito a falhas dos recursos, e este foi considerado o nível baixo. Os valores dessas falhas foram estabelecidos de acordo com estudos e pesquisas encontrados na literatura.

Para as furadeiras, fresadoras e fresadoras CNC utilizou-se os parâmetros estabelecidos por Wang *et al.* (2011), que estabelecem uma distribuição de Weibull (17151, 71,4) em minutos para o intervalo entre as falhas, e com tempo de reparo constante de 96 min.

Para os tornos convencionais e tornos CNC estabeleceu-se os valores de intervalo entre falhas de 38400 minutos com duração do reparo de 240 minutos (DEVISE; PIERREVAL, 2000).

3.4 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE MANUFATURA

O processo de simulação combinado com o projeto de experimentos consiste na realização de simulações associadas a um processo de redefinição dos níveis dos fatores de controle, previamente

estabelecidos. A Figura 3.6 ilustra os fatores de controle e sua interação com as variáveis resposta.

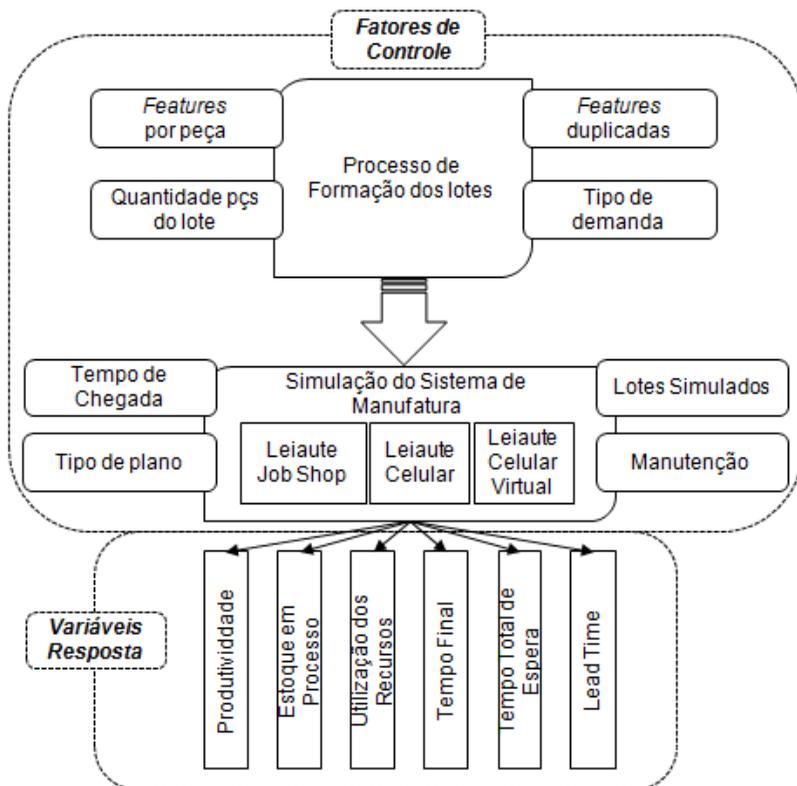


Figura 3.6 – Fatores de controle e variáveis resposta utilizados na simulação
Fonte: Autor

Para isto, antes de realizar a simulação é preciso definir as combinações dos níveis dos fatores de controle a serem realizadas. Como o experimento proposto nesta pesquisa consiste em um experimento fatorial completo, cada simulação é realizada para um determinado nível de um fator, enquanto o nível de todos os outros fatores de controle permanece inalterado.

É importante salientar que as etapas de formação de lotes e simulação do sistema de manufatura, ilustradas na Figura 3.6, são realizadas separadamente, conforme visto nos itens anteriores.

A formação dos lotes acontece utilizando planilha do *Excel*, enquanto que a simulação propriamente dita é realizada no programa de

simulação, no caso o Arena. E, por fim, novamente utilizando planilha do *Excel* os resultados são armazenados.

Para efetuar a integração dos programas supracitados, foi utilizado um ambiente de programação comum a todos. Isso permitiu que as informações geradas na etapa de formação de lotes fossem compreendidas pelo software Arena, e em fase posterior os resultados obtidos foram salvos em outra planilha. Foi utilizado o ambiente de programação em *Visual Basic*. Mais detalhes serão descritos no próximo capítulo.

3.4.1 Premissas adotadas no experimento

É importante apresentar algumas hipóteses que nortearam o experimento, seja no seu planejamento ou na modelagem do sistema propriamente dito. Dentre elas, pode-se citar:

1. As máquinas utilizadas podem fornecer a potência de corte requerida para qualquer uma das ferramentas utilizadas na pesquisa;
2. No início do processo de simulação, todos os recursos, máquinas, operadores e abastecedores, estão disponíveis;
3. Não foi considerado refugo ou retrabalho;
4. Os operadores estavam disponíveis em 100% da sua capacidade, e eventuais necessidades de ausência do posto de trabalho foram desconsideradas;
5. Admitiu-se que as tolerâncias das peças, o magazine de ferramentas e a condição das máquinas não eram fatores críticos;
6. Os estoques em processo obedeceram a regra do primeiro que entra é o primeiro que sai (*FIFO – first in first out*).

Embora a implementação deste experimento tenha sido realizada utilizando apenas aplicativos comerciais, seja o *Microsoft Excel* para a geração das ordens, ou o Arena para a simulação dos sistemas de manufatura, vale salientar que não existe impedimento para que se utilize outros aplicativos.

3.5 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Neste capítulo apresenta-se a metodologia utilizada na elaboração da pesquisa, que se refere ao emprego da simulação de sistemas computacionais aliados à técnica de projeto de experimentos.

Inicia-se apresentando o experimento realizado, destacando a forma com que foi desenvolvido o projeto das peças com base nas *features*. O modelo de simulação é estabelecido basicamente em duas etapas, a geração das peças para que se possa gerar o plano de processo, as ordens de produção e as simulações de experimentos referente aos modelos.

Enunciou-se também quais foram os fatores de controle, e como variaram. A aleatoriedade está presente na pesquisa desde a concepção do projeto das peças. Além disso foram apresentados diversos dados que serviram de parâmetros para a simulação, dos quais a maioria visava trazer aleatoriedade ao modelo.

Essa aleatoriedade se torna importante, haja vista, o mercado globalizado e exigente aos quais as empresas se deparam, com peças complexas, personalizadas, ciclos de vida cada vez mais curtos e *mix* de produção.

Ilustra-se também o modelo da simulação, o qual foi concebido com o propósito de possibilitar a variação de cada um dos fatores e níveis. Em seguida são mostrados detalhes do modelo relacionados à geração dos lotes de peças, ao planejamento de processo, às ordens de fabricação e aos três leiautes de sistemas de manufatura. No último item é discutido o procedimento que foi aplicado para combinar os fatores utilizados na realização da simulação propriamente dita e a obtenção dos resultados.

Vale ressaltar que a presente pesquisa deu seguimento aos trabalhos de Mello (2005) e Reaes (2008), conciliando condições de ambas pesquisas. Contudo, notou-se no decorrer da pesquisa a importância e complexidade do tema, bem como a lacuna de conhecimento ainda existente no que se refere ao leiaute celular virtual.

4 IMPLEMENTAÇÃO

Apresenta-se neste capítulo os aspectos referentes à implementação e ao experimento da simulação realizado nesta pesquisa. Na primeira parte deste capítulo será explicado de que forma ocorreu a geração das ordens, e na segunda parte será descrito como se deu a simulação do sistema de manufatura para cada tipo de leiaute apresentado. Será apresentado tanto a lógica de funcionamento como o procedimento operacional das duas etapas.

O capítulo iniciará apresentando a justificativa referente à seleção das ferramentas utilizadas no desenvolvimento da pesquisa.

4.1 FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO

Optou-se pela utilização de aplicativos comerciais já existentes no mercado, uma vez que desenvolver um software específico demandaria tempo de pesquisa e recursos sem justificativa, haja visto que em trabalhos anteriores já foram usados com êxito os referidos aplicativos.

Utilizou-se um aplicativo de simulação robusto, que permitisse obter resultados confiáveis, além de poder-se customizar o experimento, com a definição de certos parâmetros durante a simulação.

O software Arena se mostrou adequado às necessidades da pesquisa, sendo um software amplamente difundido e empregado na academia e nas indústrias, além da disponibilidade de literatura e licença para treinamentos.

O Arena também dispõe de ferramentas que facilitam sua customização e integração com outros programas, como o *Microsoft Excel*. Com isso, um código de programação em Microsoft Visual Basic pode ser editado no Arena por meio do ambiente Visual Basic for Application (VBA).

Além disso, selecionou-se o *Microsoft Excel* para interagir e integrar as ordens de produção no software Arena. Essa integração foi feita utilizando-se algumas funções mediante o desenvolvimento de “macros” no ambiente VBA.

A Microsoft define “macro” como uma coleção de comandos que podem ser aplicados com um único clique. A macro é desenvolvida no editor VBA, existente no próprio aplicativo.

4.2 GERAÇÃO DAS ORDENS DE PRODUÇÃO

4.2.1 Etapas para a geração das ordens de produção

A próxima etapa nesta pesquisa foi o desenvolvimento do programa para a geração das ordens de produção no Excel. Esse programa foi desenvolvido a partir da criação de macros em Visual Basic.

A grande vantagem é que o programa pode ser feito em módulos, facilitando a validação do código gerado. Por exemplo, o código “*features* geradas” pode ser visualizado na planilha sem a necessidade de acompanhar o valor de determinada variável durante a execução do programa.

Outra facilidade consiste em poder utilizar todas as funcionalidades que o *Microsoft Excel* possui em sua biblioteca, como por exemplo a função geradora de números aleatórios, a qual foi utilizada para a geração das *features*, geração das *features* duplicadas e a quantidade de peças por lote.

De um modo geral, o programa foi desenvolvido para permitir ao usuário a alteração no nível dos fatores de controle e, com isso, criar as diferentes ordens de produção. O usuário é o responsável por definir parâmetros para as *features*, ferramentas e máquinas antes de gerar uma ordem de produção.

Essa etapa foi realizada apenas uma vez no começo, e esses dados foram armazenados no Excel para servirem de banco de dados para a geração de todas as ordens de produção. Portanto, as *features*, as máquinas e as ferramentas foram as mesmas para todas as ordens de produção.

Em seguida serão apresentados os 5 passos utilizados para a geração das ordens de produção.

1º Passo: Cadastrar as Features

Inicialmente o usuário deve cadastrar as *features*, as quais já foram apresentadas nas Figuras 3.1 e 3.2. Conforme ilustrado nessas figuras cada *feature* possui um código, e a presente pesquisa utilizou 40 *features* diferentes para gerar os lotes de peças. São 20 *features* prismáticas e vinte *features* cilíndricas, as quais podem ser combinadas para formarem uma infinidade de diferentes peças. O quadro 4.1 ilustra cada *feature* e suas especificações.

Quadro 4.1 – Dados de cada *feature*

Fonte: Autor

Furo			Rebaixo				Canal				Cavidade				
cod.	diam.	prof.	cod.	compr.	largura	prof.	cod.	compr.	largura	prof.	cod.	compr.	largura	prof.	raio conc.
1	12	32	6	80	14	15	11	80	12	10	16	50	16	8	4
2	13	40	7	85	16	18	12	85	14	12	17	55	20	10	5
3	15	44	8	90	18	18	13	85	16	13	18	60	28	12	6
4	18	55	9	95	20	20	14	90	18	15	19	60	32	12	7
5	20	60	10	100	25	25	15	95	20	18	20	70	50	14	8

Torneamento Cilíndrico			Faceamento			Sangramento			Recartilhamento		
cod.	raio	compr.	cod.	raio2	raio1	cod.	diam.2	diam.1	cod.	raio	compr.
21	10	35	26	40	10	31	55	20	36	10	40
22	20	55	27	50	15	32	65	30	37	20	60
23	30	65	28	60	20	33	75	40	38	30	80
24	40	85	29	70	25	34	85	50	39	40	90
25	60	95	30	80	30	35	100	60	40	60	100

2º Passo: Cadastrar as ferramentas

Após enumerar todas as *features* que serão utilizadas na pesquisa, se faz necessário o cadastro das ferramentas que serão utilizadas nos processos de usinagem de cada *feature*.

Os dados técnicos das ferramentas foram retirados dos seguintes catálogos de fabricantes:

- para as *features* em peças prismáticas utilizou-se como base o catálogo da empresa “KC Ferramentas”, representante da marca “SGS tools company”;
- para as ferramentas para a usinagem das peças cilíndricas usou-se os dados contidos no catálogo do fabricante “SECO”.

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam respectivamente os dados de diâmetro (mm) e/ou número de dentes, e as condições de corte: profundidade de corte (mm), avanço (mm/rot) e velocidade de corte (m/min) para as ferramentas prismáticas e cilíndricas.

3º Passo: Cadastrar as máquinas

Em seguida, após o cadastro das ferramentas, faz-se o cadastro das máquinas que irão usinar as *features* cadastradas, e relacionar cada ferramenta a uma *feature*.

O apêndice I ilustra a tabela relacionando as *features*, ferramentas e máquinas. São apresentadas duas colunas para as máquinas, já ilustrando a 1ª alternativa e a 2ª alternativa. Ambas serão utilizadas no plano de processo.

Descrição				Tipo de Operação							
				Furo/Mandr./Alarg.		Rebaixo		Canal Fechado		Canal Livre	
cod.	diam.	a	n° dentes	f	vc	f	vc	fs	vcs	fo	vco
DIN6539-12	12	-	-	0,200	25	-	-	-	-	-	-
DIN6539-13	13	-	-	0,200	25	-	-	-	-	-	-
DIN6539-15	15	-	-	0,200	25	-	-	-	-	-	-
DIN6539-18	18	-	-	0,200	25	-	-	-	-	-	-
DIN6539-20	20	-	-	0,200	25	-	-	-	-	-	-
FTR-D14	14	7	2	-	-	0,035	28,5	-	-	-	-
FTR-D16	16	8	2	-	-	0,035	28,5	-	-	-	-
FTR-D18	18	9	2	-	-	0,040	28,5	-	-	-	-
FTR-D20	20	10	2	-	-	0,040	28,5	-	-	-	-
FTR-D25	25	12,5	2	-	-	0,045	28,5	-	-	-	-
FTR-D04	4	4	2	0,010	30	-	-	0,016	30	0,016	30
FTR-D05	5	5	2	0,015	30	-	-	0,024	30	0,024	30
FTR-D06	6	6	2	0,015	30	-	-	0,024	30	0,024	30
FTR-D07	7	7	2	0,025	30	-	-	0,040	30	0,040	30
FTR-D08	8	8	2	0,025	30	-	-	0,040	30	0,040	30
FTR-D10	10	10	2	0,042	30	-	-	0,066	30	0,066	30
FTR-D12	12	12	2	0,042	30	-	-	0,066	30	0,066	30
FTR-D14	14	14	2	0,042	30	-	-	0,066	30	0,066	30
FTR-D16	16	16	2	0,050	30	-	-	0,079	30	0,079	30
FTR-D18	18	18	2	0,050	30	-	-	0,079	30	0,079	30
FTR-D20	20	20	2	0,055	30	-	-	0,081	30	0,081	30
FTR-D25	25	25	2	0,055	30	-	-	0,081	30	0,081	30

Figura 4.1 – Dados de cada ferramenta para a usinagem de peças prismáticas (furadeiras e fresadoras)

Fonte: Autor

Descrição		Tipo de Operação					
		Torneamento/Faceamento		Sangramento		Recartilhamento	
cod.	ap	f	vc	f	vc	f	vc
CNMG120408-MF1	1	0,070	75	-	-	-	-
LCMF160300-0318-MG	-	-	-	0,400	40	-	-
-	-	-	-	-	-	0,500	20

Figura 4.2 – Dados de cada ferramenta para usinagem de peças cilíndricas (tornos)

Fonte: Autor

4º Passo: Calcular tempos de usinagem

Esta etapa permite ao usuário obter os tempos de usinagem de cada *feature*, os quais são calculados com base nos dados fornecidos para cada ferramenta cadastrada.

O cálculo dos tempos foi realizado com base em dois trabalhos: para as *features* prismáticas utilizou-se as equações propostas por Ferreira e Wysk (2001a), enquanto que para o cálculo das *features* cilíndricas utilizou-se as equações propostas no trabalho de Álvares (2005). A Figura 4.3 ilustra a tela de parte da planilha de *Excel* onde foram calculados todos os tempos.

	A	B	C	D	E	F	G
2		código	Tempo (min)	1º altern, Máquina	2º Altern, Máquina	Features	
3		1	0,241274315795696	1	2	Furo	
4		2	0,326725635973339	1	2	Furo	
5		3	0,414690230273853	1	2	Furo	
6		4	0,622035345410779	1	2	Furo	
7		5	0,753982236861550	1	2	Furo	
8		6	2,226672687807500	2	3	Rebaixo	
9		7	2,746334630506570	2	3	Rebaixo	
10		8	2,901839530026360	2	3	Rebaixo	
11		9	3,444728786830910	2	3	Rebaixo	
12		10	4,210224072793340	2	3	Rebaixo	
13		11	0,832998052088203	2	3	Canal	
14		12	1,094797439887350	2	3	Canal	
15		13	1,332796883341120	2	3	Canal	
16		14	1,378589181322100	2	3	Canal	
17		15	1,670213815832550	2	3	Canal	
18		16	1,79057525589413	3	2	Cavidade	
19		17	2,06465986328514	3	2	Cavidade	
20		18	2,67440856088424	3	2	Cavidade	
21		19	2,74081246917260	3	2	Cavidade	

Figura 4.3 – Planilha de dados com o cálculo dos tempos de usinagem de cada *feature*
Fonte: Autor

No apêndice II é apresentada a tabela com todos os tempos calculados.

5º Passo: Gerar ordens de produção

De posse dos dados obtidos nos passos anteriores pode-se gerar as ordens de acordo com o nível definido para os fatores de controle relacionados à peça, que são: *features* por peça, quantidade de *features* duplicadas, quantidade de peças por lote, e o tipo de demanda. Assim inicialmente a aba “PlanoDeProcesso” da planilha de dados está vazia. Para iniciar a geração das ordens deve-se clicar no botão “Gerar Peça”, conforme ilustrado na Figura 4.4.

Todos os passos anteriormente realizados foram feitos apenas uma única vez, enquanto que o 5º passo foi executado sempre que se desejava alterar o nível de um dos fatores de controle.

OrdensDeProdução - Excel DANIELA MARA DA SILVA DECKER

ARQUIVO PÁGINA INICIAL INSERIR LAYOUT DA PÁGINA FÓRMULAS DADOS REVISÃO EXIBIÇÃO

BM8

Gerar Peça Limpar

Plano de Processo								
3	Lote	Features Utilizadas	Qtde de Duplic. Feature	Qde.	Sequencia 1ª opção	Tempo 1ª Opção (min)	Sequencia 2ª opção	2ª Opção (min)-Penalidade
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								

PRONTO

Figura 4.4 – Planilha de dados “PlanoDeProcesso”

Fonte: Autor

A Figura 4.5 ilustra os campos que são alterados de acordo com o nível estabelecido para cada fator.

Dados do experimento

Quantidade de features:

Quantidade de lotes simulados:

Features por peça: Mínimo Máximo

Features duplicadas: Mínimo Máximo

Quantidade de peças por lote: Mínimo Máximo

Tipo de Demanda: Demanda Aleatória demanda Projetada

OK Cancel

Figura 4.5 – Janela para inclusão dos valores de cada nível dos fatores de controle

Fonte: Autor

O campo “quantidade de *features*” permite ao usuário selecionar a quantidade de *features* que ele deseja utilizar para gerar as diferentes peças. Esse campo define a quantidade máxima de *features* utilizadas na geração das peças. Assim, pode-se definir uma quantidade de *features* menor ou igual à quantidade cadastrada para ser utilizada na geração das peças.

O campo seguinte “quantidade de lotes simulados” define a quantidade de ordens de produção que serão geradas pelo sistema. Assim, se o usuário desejar simular a fabricação de 1000 lotes, ele deverá informar esse valor neste campo.

Os campos seguintes definem o nível para os fatores de controle: *features* por peça, *features* duplicadas por peça e quantidade de peças por lote, respectivamente. Cada fator dispõe de dois campos, onde define-se a faixa de variação de cada um dos dois níveis (alto e baixo). Por último tem-se o fator de controle tipo de demanda.

Após inserir os valores desejados em todos os campos da janela “Dados do experimento”, o usuário aciona com um clique o botão “OK”, o qual dá início ao processo de geração das ordens de produção e, com isso, os valores que foram inseridos na janela “Dados do experimento” são lidos pelo programa auxiliar.

É utilizado nessa etapa o gerador de números aleatórios do Excel, para que as peças geradas e suas respectivas ordens de produção possam ser as mais aleatórias possíveis. A Figura 4.6 ilustra uma das possíveis combinações e seus resultados. O procedimento como um todo é apresentado no próximo item.

4.2.2 Procedimento utilizado para gerar as ordens de produção

Para facilitar a compreensão do procedimento é apresentado na Figura 4.7 um fluxograma para o programa gerador de ordens de produção.

Inicia-se obtendo os dados do experimento de acordo com os fatores de controle e seus respectivos níveis. Como é ilustrado na Figura 3.6, no processo de geração dos lotes de peças são quatro fatores que influenciam essa etapa.

Os níveis e as faixas de valores de cada nível são inseridos através da janela “Dados do experimento”, conforme a Figura 4.5, permitindo definir aleatoriamente valores de cada fator de controle dentro do intervalo determinado.

A primeira situação que o programa analisa é se o tipo de demanda é aleatório ou projetado, e esse fator influencia toda a geração de peças. Caso a demanda seja projetada a geração dos diferentes tipos de peça passa a ser estabelecida segundo os critérios já apresentados.

Depois, define-se aleatoriamente a quantidade de *features* que cada peça terá. Em seguida, é gerada a quantidade de vezes que cada *feature* irá repetir. A próxima etapa se dá ao gerar aleatoriamente a quantidade de peças que cada lote terá. A função aleatória gera os valores de peças de cada lote dentro do intervalo estipulado pelo nível do fator de controle.

Em seguida uma função calcula o tempo de usinagem para cada uma das *features* geradas, levando em consideração as informações cadastradas no banco de dados de *features* e ferramentas. Além disso, deve-se levar em conta a quantidade de duplicações de uma mesma *feature* e a quantidade de peças que o lote terá.

Lote	Features Utilizadas	Plano de Processo																																																								
		Qtd de Duplic. Feature	Qtd de Sequencia 1ºopção	Tempo 1ºOpção(min)	Sequencia 2ºopção																																																					
1	21	3	4	2	1	8	3	5	3	2	5	2	4	1	3	3	4	6	3	1	12	4																																				
2	2	30	32	39	5	32	16	35	4	1	3	2	1	2	3	2	1	4	10	2	2	4	4	3	5	2	4	2	0	10	8	3	4	2	2	5	14	3																				
3	16	5	18	9	8	17	28	35	31	3	1	3	2	1	3	2	3	5	5	5	1	3	10	6	4	2	10	2	2	2	2	3	3	2	4	4	4	8	1	4	14	8	6	3	14	3												
4	20	7	5	29	28	31	10			2	1	1	1	3	2	1	5	5	5	2		7	3	1	4	1	1	8			2	3	2	4	4	3		9	4	1	6	10	1	12														
5	23	37	31	39	9	19	10	11	17	2	2	2	3	1	3	1	2	1	1	1	3	1	2	3	8	4	2	2			5	5	4	3	2	3	3	2	4	2	3	4	5	3	2	4	2	3	4	5	12	6	2	3				
6	4	16	37	15	9	33	18	26	17	29	1	2	2	1	1	3	2	3	5	3	5	1	2	1	3	3	8	1	6	12	2	2	5	3	4	2	4	2	4	1	3	2	5	5	3	11	9	17										
8	34	17	26	7	33	38	35	13	16	9	2	1	3	1	3	1	3	1	3	1	28	5	3	5	2	5	2	0	8	2	10	1	5	3	4	2	4	3	4	5	4	3	3	7	3	1	12	3	3	14	2	7	5					
8	23	16	19	17	30	4	9	37	7	1	1	3	2	3	3	3	3	3	5	1	2	4	2	2	3	6	14	2	10	2	8	5	2	2	4	2	3	5	3	2	3	4	9	19	3	14	3	12										
9	13	20	6	21	11	16	3			1	3	1	2	1	3	3					18	2	3	2	4	2	3	1	1	10	2	1	1	5	1			3	2	3	5	3	2	2	2	14	3	1	1	8	2							
10	39	22	1	33	19	13	24	35	19	3	2	3	3	2	2	2	3	2	1	4	1	5	3	2	4	5	2	3	2	1	6	5	3	5	7	10			5	5	2	4	2	3	5	4	3	4	2	1	8	8	4	6	9	14		
11	4	22	12	6	5	34	10			1	3	1	2	2	3	2					16	1	4	2	2	1	5	2			1	2	1	4	2	8	8			2	5	3	3	2	4	3		1	3	2	6	2	11	12				
12	28	34	19	16	9	5	29	27	25	21	3	3	2	1	1	2	3	2	2	4	5	3	3	2	1	5	15	4	7	8	5	2	3	1	8	4	8	1	4	4	2	2	3	2	4	4	5	10	11	8	3	5	11	6	11	1		
13	19	7	15	22	33	17	25	10	27	3	2	3	3	3	2	3	2	4	5	3	4	2	5	8	5	5	2	6	6	8	10	3	2	3	3	5	4	2	5	3	4	2	3	4	12	8	7	3	8	9	11	18	4					
14	34	38	23	29	19	28	31	36			2	3	1	1	2	3	2				38	5	4	4	5	2	5	5	4	5	2	2	4	1	5	3	1			4	5	5	4	3	4	5		7	3	2	6	2	7	4	1			
15	12	27	28	38	40	7	25	33	26	1	2	1	3	1	2	1	1	3			11	2	5	5	4	2	4	5	5	1	3	2	2	1	5	4	2	1			3	4	4	5	3	5	4	4	2	4	3	3	2	8	5	3	2	
16	40	16	7	26	27	18	1	15			1	3	1	1	2	2	3				49	4	3	2	5	3	1	2			1	5	3	0	1	5	0	5			5	2	3	4	4	2	2	3		2	8	4	1	2	7	1	7	
17	9	35	23	40	38	22	30	20			3	3	1	2	1	3	3	2			47	2	5	4	4	4	5	3	10	10	2	3	1	2	20	7			3	4	5	5	5	4	2	14	14	2	4	1	3	29	9					
18	3	26	12	30	11	21	2	23	1	3	1	1	1	3	2	1	1	3			16	1	5	2	5	2	4	1	4	1	0	1	7	2	1	0	2	1			2	4	3	4	3	5	2	5	2	2	1	2	10	3	1	0	2	1
19	11	17	27	39	9	31				1	2	3	2	2							32	3	2	3	5	4	2	5	3	2	6	3	3	7	2					2	3	2	4	5	3	4		4	2	9	4	4	10	3				
20	30	1	6	26	39	15	37			1	1	1	1	2	3	3					43	5	1	2	5	4	2	4	7	0	2	0	2	5	2					4	2	3	4	5	3	5		10	0	3	1	3	7	3				

Figura 4.6 – Planilha com a ordem de produção gerada
Fonte: Autor

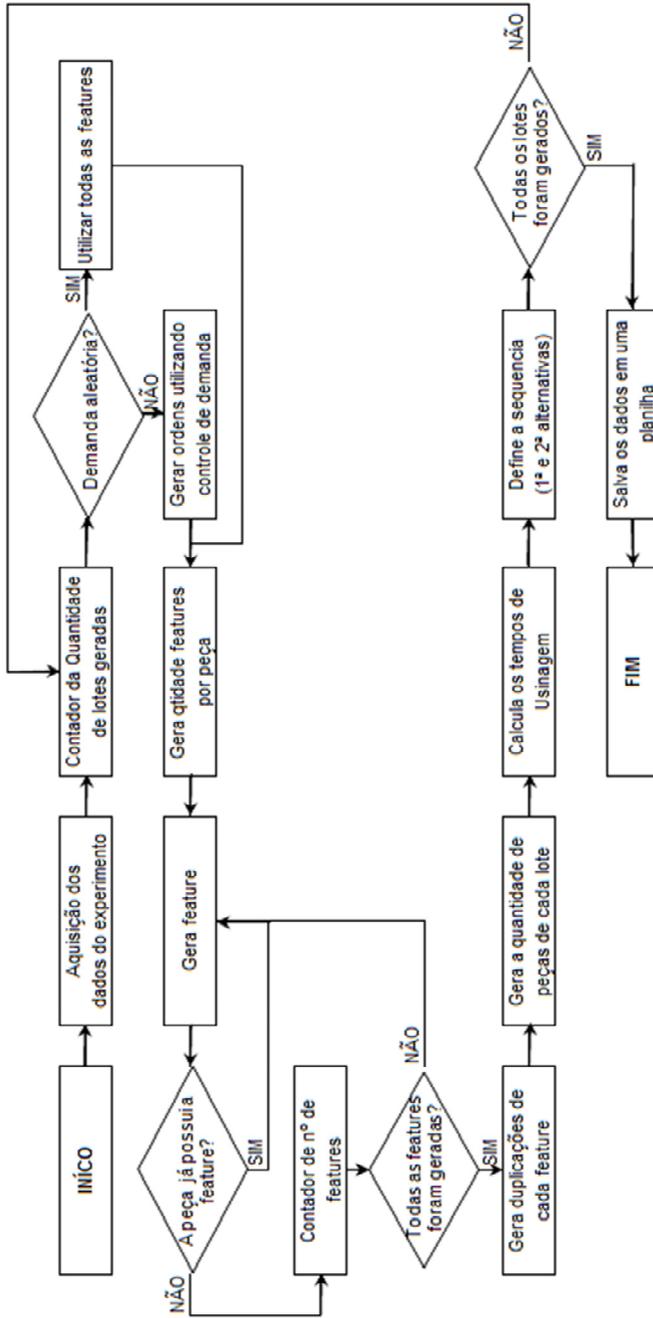


Figura 4.7 – Fluxograma para a geração das ordens de produção
Fonte: Autor

A sequência de máquinas que será utilizada para a fabricação de cada *feature* corresponde às máquinas cadastradas no passo 3. O programa também obedece a sequência em que as *features* foram geradas, e essa mesma sequência será obedecida na ordenação das máquinas.

Em consequência, a sequência de fabricação de cada lote de peças também será aleatória. É importante ressaltar que como nesta etapa ainda não foi definido se o plano de processo será utilizado com ou sem alternativas, os cálculos de tempos de usinagem, bem como a sequência de máquinas, são feitos para as duas situações, conforme apresentado na Figura 4.6.

Todas as etapas citadas acima são realizadas para gerar cada lote de peças, ou seja, cada linha apresentada na Figura 4.6 representa um lote diferente de peças. Em função da aleatoriedade proposta, espera-se a maior variação possível de tipos diferentes de peças em cada lote. Entretanto, deve-se ressaltar que sempre são obedecidos os intervalos propostos pelos níveis de cada fator de controle.

O processo se repete até que a quantidade de lotes que foi estipulada na janela “Dados do experimento” seja atingida.

Assim, uma mesma ordem de produção é formada por vários lotes diferentes com uma mesma combinação.

Ao final do processo a ordem de produção para cada lote gerado é armazenada em uma planilha, tal como a mostrada na Figura 4.6. Utilizou-se uma sequência lógica para armazenar as 16 planilhas, tendo sido salvas com o seguinte nome: “S1”, ou seja, “S” de simulação e o número “1” referente a uma determinada combinação de níveis. Essa combinação para as 16 planilhas é apresentada na Figura 4.8. O valor “-” refere-se ao nível baixo de cada fator, enquanto o valor “+” refere-se ao nível alto de cada fator de controle.

Na Figura 4.6 é destacado o lote de número 10. A primeira coluna indica o número do lote, o qual serve como referência para identificar cada lote gerado. Na próxima coluna tem-se o código das *features* geradas e, portanto, para cada código que é apresentado existe uma associação com o cadastro de *features*.

A próxima coluna associa o número de duplicações que cada *feature* terá, ou seja, a posição dos valores está relacionada. A posição da quantidade de *features* está relacionada com a posição idêntica das *features* já geradas.

Por exemplo, para o lote de número 10, destacado na Figura 4.6, a *feature* 39 está presente 3 vezes, a *feature* 22 está presente 2 vezes, a *feature* de número 1 está presente 3 vezes, a *feature* de número 33 está

presente e vezes na peça, e assim por diante. A Figura 4.9 ilustra uma possível peça gerada a partir desses atributos.

n°	Features por Peça	Features Duplicadas	Quantidade de Peças de cada Lote	Tipo de demanda
S1	-	-	-	-
S2	-	-	-	+
S3	-	-	+	+
S4	-	+	+	+
S5	+	+	+	+
S6	+	+	+	-
S7	+	+	-	-
S8	+	-	-	-
S9	+	-	-	+
S10	+	-	+	+
S11	+	+	-	+
S12	+	-	+	-
S13	-	+	+	-
S14	-	+	-	+
S15	-	+	-	-
S16	-	-	+	-

Figura 4.8 – Combinações dos níveis de cada fator de controle

Fonte: Autor

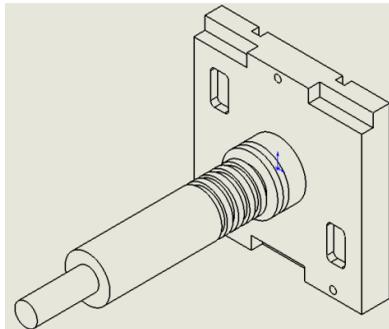


Figura 4.9 – Possível peça gerada de acordo com os atributos do lote 10 da ordem de produção

Fonte: Autor

Na coluna “Qde.”, da Figura 4.6, é indicada a quantidade de peças que o lote irá conter, correspondendo a 27 peças. As colunas que seguem estão relacionadas diretamente ao plano de processo para a fabricação dos lotes de peças, relacionando os tempos de usinagem e a sequência das máquinas.

A sequência das máquinas e os tempos de usinagem estão dispostos na ordem de produção de forma sequencial para cada *feature*.

Os números das máquinas (1, 2, 3, 4 e 5) são respectivamente: furadeira, fresadora, fresadora CNC, torno e torno CNC, conforme apresentado no quadro 3.3.

Por exemplo, o lote de peças de número 10 é composto pelas *features* 39, 22, 1, 33, 19, 13, 24, 35 e 9, e se a usinagem for realizada na máquina selecionada como primeira opção, as máquinas especificadas na sequência para usinagem de cada uma dessas *features* é a seguinte: 4, 4, 1, 5, 3, 2, 4, 5 e 2. Já os tempos arredondados, em minutos, para a usinagem de cada uma das *features*, considerando a duplicação, serão 3, 2, 1, 6, 5, 3, 5 e 7, respectivamente.

Nesse caso, para a segunda opção, tem-se as mesmas *features*, porém são consideradas as máquinas alternativas para formar a sequência. Para o exemplo citado tem-se as máquinas 5, 5, 2, 4, 2, 3, 5, 4 e 3, respectivamente, e os seguintes tempos arredondados (em minutos): 4, 2, 1, 8, 8, 4, 6 e 9, respectivamente.

Embora a exibição da planilha apresentada na Figura 4.6 não represente as casas decimais, as mesmas são consideradas pelo *Microsoft Excel*. Os valores de tempos para cada *feature*, com casas decimais, estão apresentados no Apêndice II.

Antes de gerar uma nova combinação de fatores é executada a função “Limpar”, apresentada na Figura 4.4, função essa que apaga todos os dados da planilha referentes à combinação anterior, permitindo a geração de uma nova combinação.

Após gerar as ordens de produção para a combinação de todos os níveis dos fatores definidos para o experimento, realiza-se a simulação no software Arena.

4.3 SIMULAÇÃO DOS SISTEMAS DE MANUFATURA

A modelagem de um sistema no software Arena compreende as seguintes etapas:

- Determinação da lógica do sistema;
- Atribuição dos dados ao modelo;
- Execução da simulação.

Cada uma dessas etapas será descrita para cada um dos três modelos diferentes implementados no Arena.

4.4 DETERMINAÇÃO DA LÓGICA DO SISTEMA

A determinação da lógica do sistema possibilita a representação do mesmo utilizando os módulos disponíveis nas *templates* do Arena. A Figura 4.10 contém um fluxograma visando facilitar a compreensão da lógica de simulação de cada modelo.

4.4.1 Parâmetros gerais comuns aos três modelos

Alguns parâmetros foram estabelecidos como sendo comuns aos três modelos, tendo em vista que o objetivo da pesquisa é a comparação entre eles. Dentre esses parâmetros tem-se os tempos de *setup*, número de máquinas, critérios de manutenção, critérios para ordenação das filas.

Inicialmente são definidos os dados da simulação pelo usuário, tais como tipo de plano de processo, a quantidade de lotes que serão simulados, tempo de chegada do próximo lote, e se o sistema terá plano de manutenção. Também define-se qual dos 16 arquivos gerados na etapa anterior será utilizado em cada uma das simulações.

A chegada de um lote é o evento que inicia o processo de simulação do sistema, já que o tempo de chegada do primeiro lote é zero. O tempo de chegada do próximo lote é um fator de controle, e seus pormenores já foram discutidos no capítulo 3.

O modelo deve ser capaz de diferenciar cada lote quanto ao tipo de *features* de cada lote, as duplicações de *features* e a quantidade de peças em cada lote. Em seguida, de acordo com as *features* existentes em cada lote de peças, são definidas as operações a serem executadas, e a partir das operações definem-se as máquinas para a fabricação dos lotes de peças.

Antes de verificar as máquinas, deve-se observar se o plano de processo terá ou não alternativas. Caso o usuário opte por um plano sem alternativas, seleciona-se a máquina definida como primeira opção para a usinagem daquela *feature*. Por outro lado, caso o plano escolhido tiver alternativas, leva-se em conta o estoque em processo para selecionar a máquina, ou seja, antes de direcionar para a 1ª ou 2ª opção de máquina, o sistema verifica a máquina que está com a menor fila.

Definidos os tempos, é requisitado um abastecedor para efetuar o transporte do lote. Todos os deslocamentos que o abastecedor faz possuem rotas e velocidades definidas e, com isso, consegue-se obter os tempos relativos aos transportes dos lotes de peças.

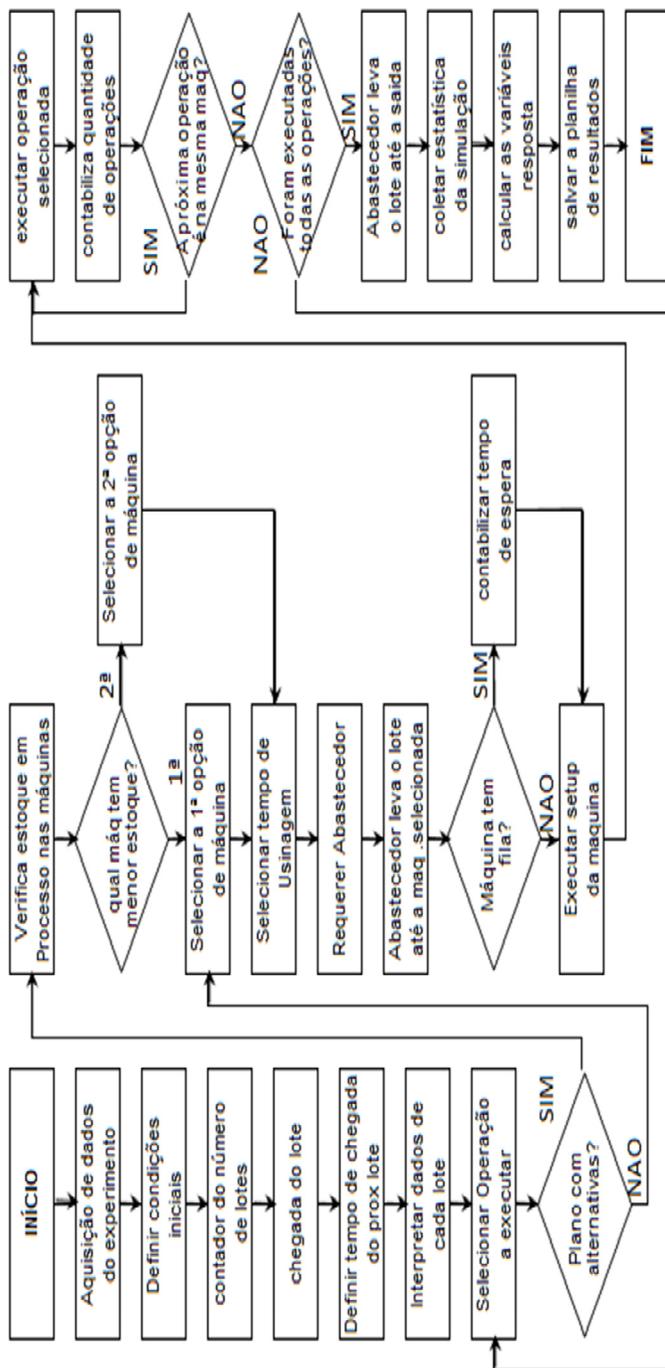


Figura 4.10 – Fluxograma geral para os três modelos simulados

Fonte: Autor

Embora a priori todos os recursos são considerados disponíveis, antes de se realizar a operação selecionada verifica-se a existência de estoques em processo nos recursos. Caso não houver estoque em processo a operação é realizada imediatamente, do contrário o tempo de espera para ser processado é contabilizado e apresentado no relatório da simulação.

Antes de iniciar a usinagem do lote de peças, o operador faz o *setup* da máquina. De acordo com cada máquina tem-se um valor específico de tempo de *setup* conforme apresentado no capítulo 3.

O lote só deixa a máquina quando todas as peças do lote foram usinadas. No caso do plano de processos com alternativas, antes de deixar a máquina, verifica-se a possibilidade da segunda opção de máquina para a próxima operação ser igual à máquina atual. Isso se faz comparando o estoque em processo na máquina selecionada para a próxima operação (primeira opção) com o recurso atual (segunda opção de máquina). Se a segunda opção de máquina para a próxima operação for igual à máquina atual, avalia-se o estoque em processo de maneira a evitar a mudança de máquina. Dessa forma, reduz-se significativamente o número de *setups*.

Por fim, verifica-se se todas as operações foram realizadas. Caso houver mais operações a serem executadas, o modelo segue a seqüência estabelecida nas planilhas de Excel conforme a Figura 4.6, do contrário o lote deixa o sistema e seus dados estatísticos são coletados.

Quando a simulação chega ao fim, com todos os lotes simulados, armazena-se o relatório gerado pelo Arena com os dados que serão utilizados no cálculo das variáveis resposta.

De um modo geral, pode-se representar a lógica de um sistema no software Arena por meio dos módulos disponíveis em cada *template*. Porém, como o modelo neste trabalho possui um nível de detalhamento um pouco maior que o usual, foi necessário usar a linguagem Visual Basic para desenvolver programas auxiliares integrados aos modelos simulados no Arena.

4.4.2 Lógica do leiaute funcional

O modelo funcional segue a proposta apresentada no capítulo 2. As máquinas estão divididas em 5 departamentos, e cada departamento contém 2 máquinas de cada tipo.

Inicialmente o lote chega ao sistema, e é direcionado ao departamento que contém a máquina que executará a primeira *feature*. O abastecedor é responsável por pegar o lote na entrada do sistema e levá-lo até a entrada do departamento.

Depois o operador da máquina executa as operações, e o lote fica disponível para o abastecedor levá-lo até o próximo departamento. Essa sequência de atividades ocorre até que todas as operações necessárias para a fabricação do lote sejam finalizadas.

Quando todas as operações forem concluídas, o abastecedor leva o lote de peças até a saída do sistema. Depois disso, são coletados os dados necessários para o cálculo das variáveis resposta, e esses dados são gravados no relatório do Arena. A Figura 4.11 ilustra o modelo funcional de uma forma geral, referente ao modelo “JS_05_09_14.doe”, que é o modelo final montado no software Arena, de onde foram extraídos os resultados referentes ao leiaute funcional.

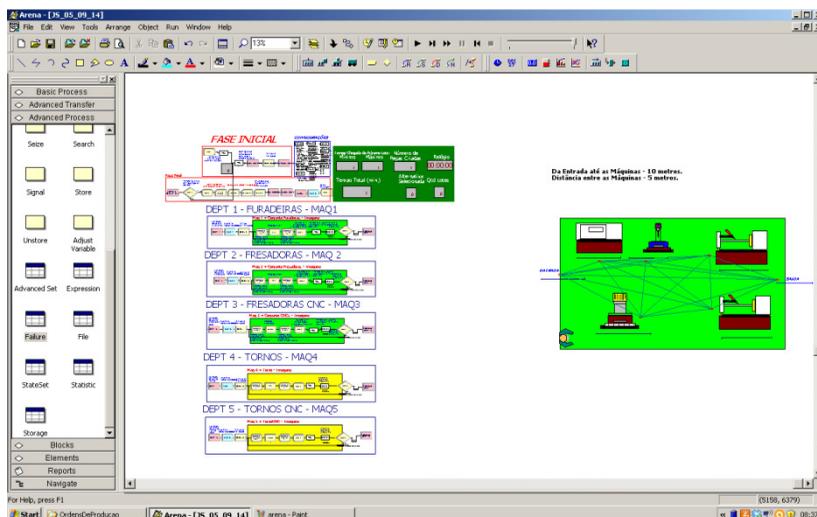


Figura 4.11 – Leiaute funcional montado no Arena

Fonte: Autor

A Figura 4.12 apresenta a fase inicial do referido modelo, na qual os principais dados foram adquiridos e interpretados pelos programas auxiliares em Visual Basic. Isso foi feito mediante os blocos “VBA 1” e “VBA 16” que aparecem na Figura.

A Figura 4.13 ilustra como foi montada a lógica de um dos departamentos no modelo funcional. O lote de peças é trazido pelo abastecedor até a entrada do departamento, o abastecedor é liberado, o operador pega o lote e executa as operações. Alguns parâmetros do modelo são atualizados, verifica-se se a próxima operação será executada

na mesma máquina e, se for o caso, o lote retorna ao sistema. Caso contrário, o lote é liberado do departamento, e o abastecedor é requisitado para levar o lote de peças para o próximo departamento.

A Figura 4.14 ilustra a fase final do modelo referente ao leiaute funcional. Sempre que um lote deixa o departamento ele retorna à fase final, e nessa fase verifica-se inicialmente se todas as operações foram executadas. Se alguma operação ainda não foi executada, o abastecedor leva o lote até o departamento. Caso contrário, se todas as operações foram executadas, o lote de peças é submetido ao cálculo de algumas das variáveis resposta que serão apresentadas no relatório padrão do Arena, e então é finalizada a simulação daquele lote.

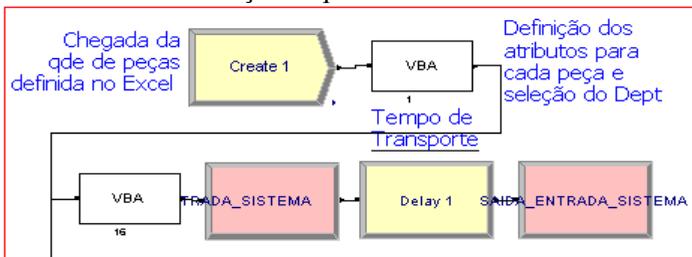


Figura 4.12 – Fase inicial do modelo funcional

Fonte: Autor

DEPT 3 - FRESADORAS CNC - MAQ3

Maq 3 = Conjunto CNCs - 1maquina

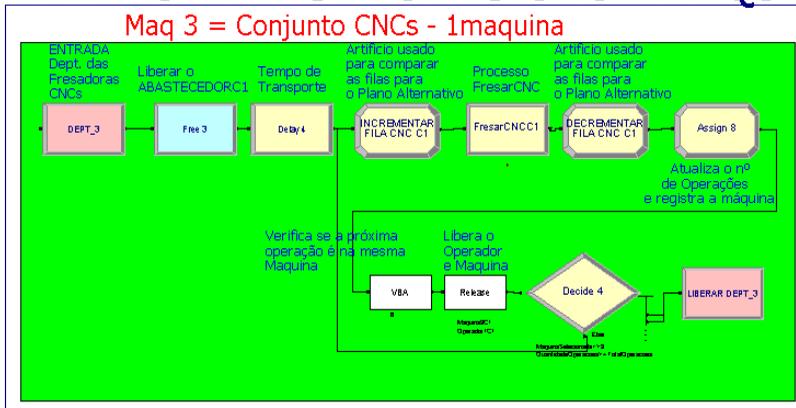


Figura 4.13 – Exemplo de departamento do leiaute funcional

Fonte: Autor

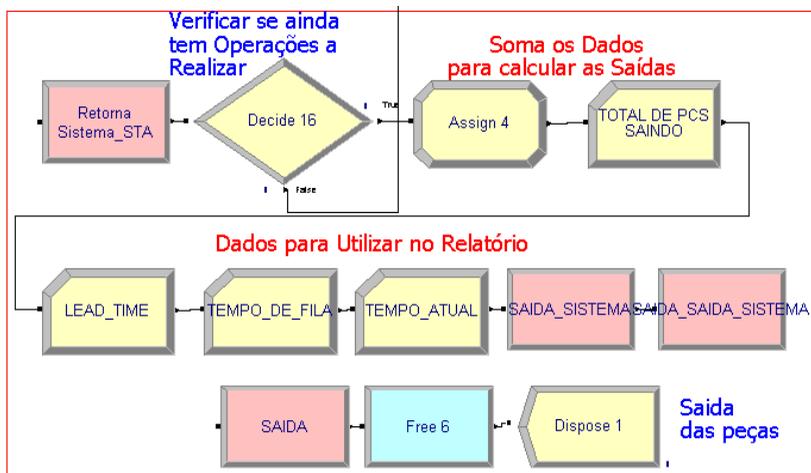


Figura 4.14 – Fase final do leiaute funcional

Fonte: Autor

4.4.3 Lógica do leiaute celular

No modelo do leiaute celular tradicional desenvolvido nesta pesquisa, as máquinas estão divididas em 3 células, e cada célula atende a um tipo específico de peças: a célula 1 atende apenas peças prismáticas, a célula 2 atende peças que contenham *features* prismáticas e *features* cilíndricas, e a célula 3 atende a demanda de peças estritamente cilíndricas.

A célula 1 é composta por 1 furadeira, 1 fresadora convencional e uma fresadora CNC. A célula 2 é formada por 1 furadeira, 1 fresadora, 1 fresadora CNC, 1 torno convencional e 1 torno CNC. Por último, a célula 3 é composta por 1 torno convencional e 1 torno CNC. Cada célula tem um abastecedor à sua disposição.

Após adquiridos os dados, inicialmente o modelo verifica para qual célula deve ser enviado o lote de peças. Depois do lote ser enviado para uma das 3 células, ele era todo processado nesta célula, não havendo troca de célula. Após o lote ser processado ele é direcionado à fase final do modelo, onde os dados são coletados e a simulação do lote é encerrada.

A Figura 4.15 ilustra a tela do modelo “LC_05_09_14.doe”, o qual foi utilizado para a coleta dos dados que posteriormente foram usados da análise estatística.

A Figura 4.16 ilustra a fase inicial do modelo celular. Nesta fase são definidos os atributos dos lotes de peças no programa em Visual Basic mediante o bloco “VBA 1”, também responsável por direcionar o lote para a célula específica. Ou seja, o programa auxiliar em Visual Basic lê quais as máquinas que cada lote de peças precisa, e então direciona o lote para a célula correta.

As Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 ilustram as três células. Analisando a célula 1, verifica-se a seguinte lógica, após o lote de peças chegar a célula adequada, o programa auxiliar verificava para qual máquina o lote deveria ser enviado. Dessa forma, era solicitado o abastecedor da célula, e o mesmo levava o lote até a referida máquina, para que as operações fossem executadas.

Da mesma forma, como no leiaute funcional, a lógica das operações é a mesma. O lote é deslocado até a máquina e o operador executa as operações necessárias. Mediante o programa auxiliar são atualizados alguns dados, como a quantidade de operações já executadas, para qual máquina o lote irá posteriormente, etc.

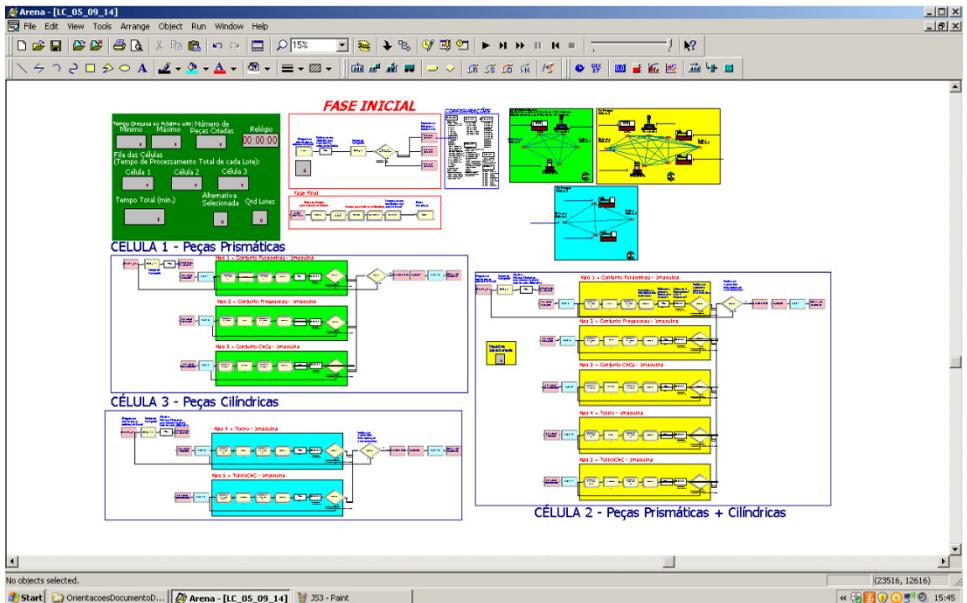


Figura 4.15 – Modelo celular montado no Arena

Fonte: Autor

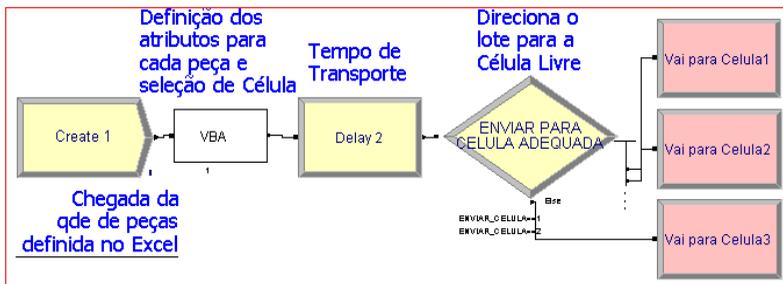


Figura 4.16 – Fase inicial do leiaute celular

Fonte: Autor

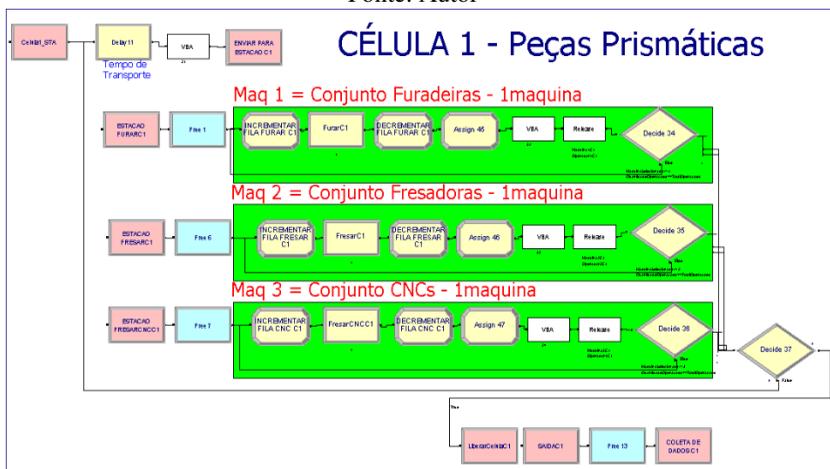


Figura 4.17 – Célula 1 do leiaute celular

Fonte: Autor

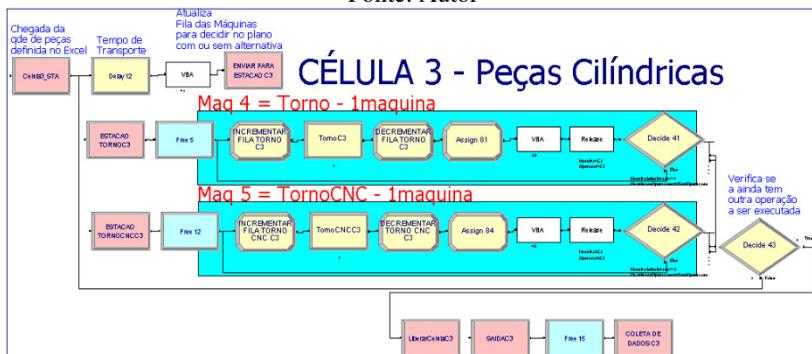


Figura 4.18 – Célula 3 do leiaute celular

Fonte: Autor

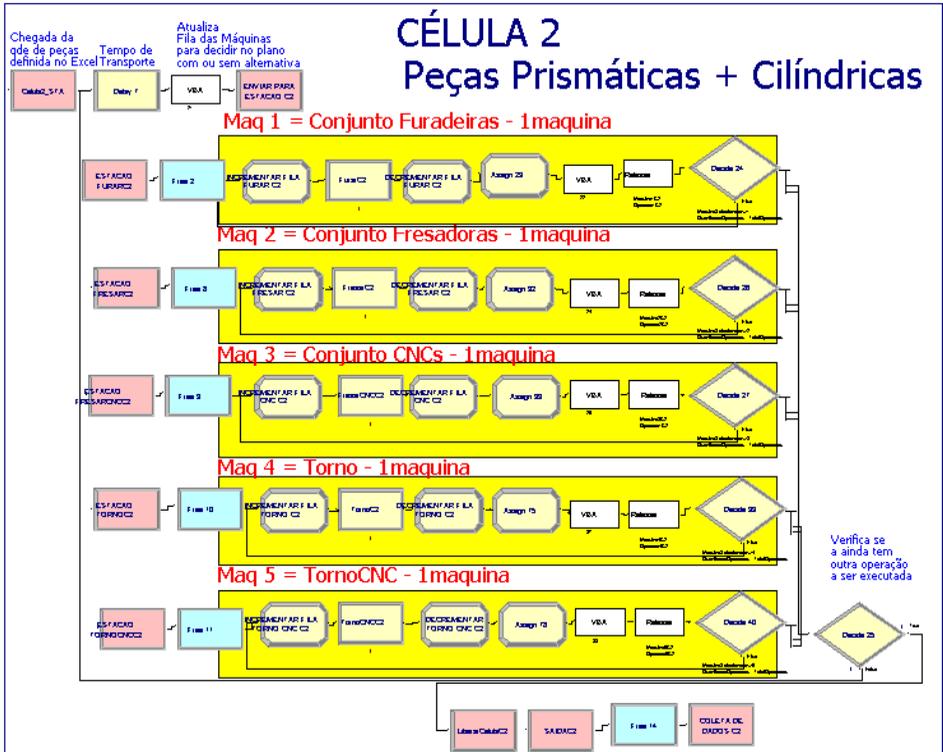


Figura 4.19 – Célula 2 do leiaute celular

Fonte: Autor

Após todas as operações realizadas, os lotes são levados até a saída do sistema pelo abastecedor. É importante mencionar que o abastecedor é dedicado à célula, e cada célula possui seu abastecedor. A Figura 4.20 ilustra a fase final do modelo celular.



Figura 4.20 – Fase final do leiaute celular

Fonte: Autor

4.4.4 Lógica do leiaute celular virtual

A lógica do modelo celular virtual é semelhante à do leiaute funcional. A grande diferença é que, ao contrário do funcional, o leiaute celular virtual reserva todos os recursos necessários para a fabricação de determinado lote antes de iniciar a fabricação. Ou seja, em um primeiro momento o programa auxiliar em Visual Basic lê todos os atributos de cada lote, e as necessidades de recursos. Então esses recursos são reservados, formando-se assim uma célula virtual. Fisicamente as máquinas continuam dispostas em forma de departamentos.

A Figura 4.21 ilustra o modelo do leiaute celular virtual elaborado no software Arena, o qual foi gravado com o nome de arquivo “CV_18_09_14.doe”. A partir dele foram extraídos os dados necessários para o cálculo das variáveis resposta.

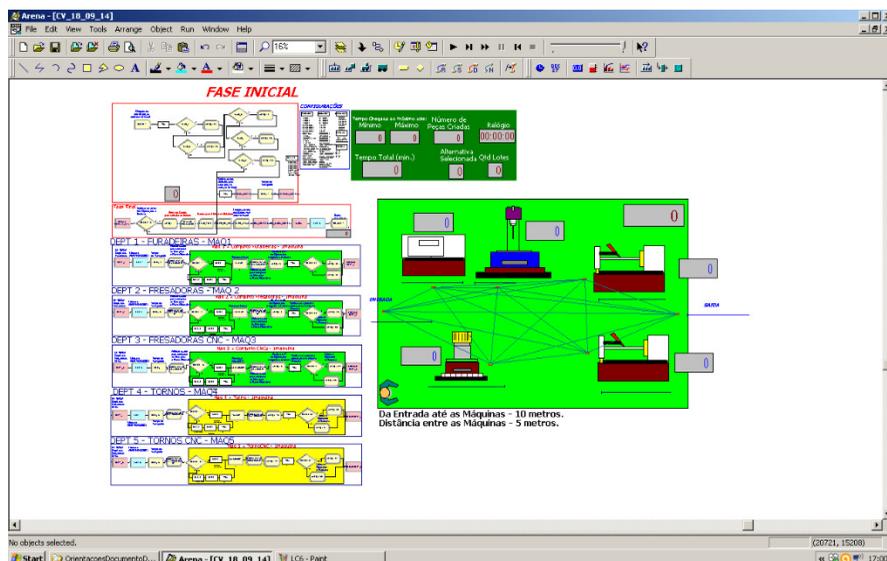


Figura 4.21 – Modelo leiaute celular virtual montado no Arena

Fonte: Autor

Dessa forma, na fase inicial são lidos os parâmetros mediante o programa auxiliar programado em Visual Basic, leitura essa que é feita no primeiro bloco “VBA” que aparece na Figura 4.22.

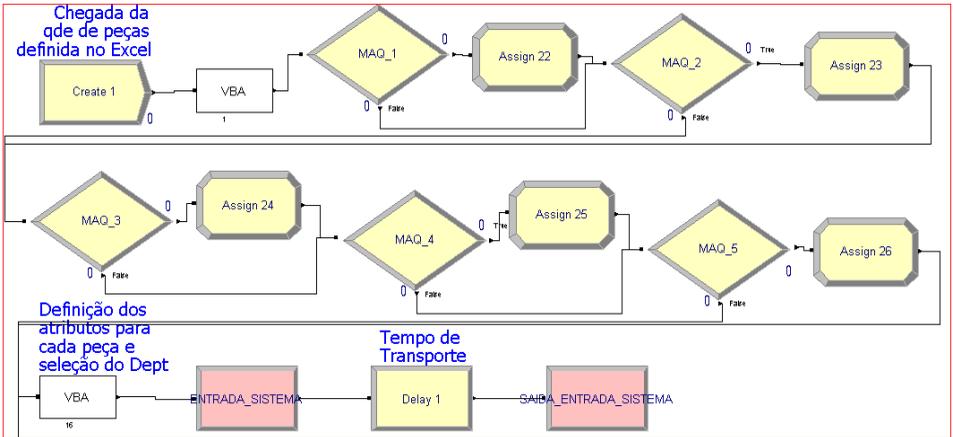


Figura 4.22 – Fase inicial do modelo celular virtual

Fonte: Autor

Após a leitura dos dados no bloco “VBA”, o lote de peças verifica quais as máquinas que seriam necessárias para a fabricação dos lotes. Mediante os blocos de decisão faz-se a reserva de todos os recursos necessários, formando assim a célula virtual.

Depois das máquinas terem sido reservadas, o lote é fabricado passando pelas diferentes operações. O recurso é liberado quando ele deixa de ser necessário na fabricação daquele lote. Por exemplo, se a máquina 1 for necessária em duas ou três oportunidades no processo de fabricação, ela é liberada apenas ao fim da terceira vez que o lote passa pela máquina. Após ser utilizado, o recurso é então liberado.

A fase final é semelhante ao modelo funcional. Se todas as operações forem executadas, o lote de peças é submetido ao cálculo de algumas das variáveis resposta que serão apresentadas no relatório padrão do Arena. Então é finalizada a simulação daquele lote.

4.5 ATRIBUIÇÃO DE DADOS AOS TRÊS MODELOS

Os dados atribuídos aos três modelos foram classificados em três tipos: dados fixos, dados variáveis e dados mistos. Os dados fixos permanecem iguais para todos os três modelos e todas as combinações dos fatores de controle utilizadas. Por outro lado, os dados variáveis necessitam ser alterados pelo usuário a cada nova simulação. Os dados variáveis são os fatores de controle que serão utilizados nas simulações dos modelos, os quais são: tempo de chegada entre os lotes, tipo de plano

utilizado, quantidade de lotes a ser simulada em cada modelo e, por fim, se o sistema possui ou não plano de manutenção.

Os dados mistos podem ser determinados mediante o programa auxiliar em Visual Basic. Os dados mistos podem ser compostos por dados fixos e variáveis.

Os dados fixos para estes modelos foram: os tempos de *setup*, os tempos de troca de ferramenta, os tempos de manuseio dos lotes pelos operadores e a quantidade de replicações.

Alguns dos dados mistos são: tempos de fabricação, seqüências de fabricação, filas dos processos. Os dados fixos são definidos usando os módulos e funções disponíveis no software Arena, enquanto os dados variáveis são definidos através de uma janela associada ao programa auxiliar em Visual Basic, que se abre a cada início de simulação, a qual é mostrada na Figura 4.23. Apenas o fator de controle “manutenção”, apesar de ser um dado variável, era alterado diretamente no modelo de acordo com a combinação selecionada.

Quanto aos dados mistos, eles são atribuídos aos módulos e funções por meio de variáveis cujos valores eram definidos pelo programa auxiliar com base nos dados definidos pelo usuário. Na Figura 4.23, o usuário define entre os dois níveis de cada fator nos itens tipo de plano, quantidade de lotes simulados e tempo de chegada entre lotes. De acordo com os níveis o programa auxiliar interpreta os parâmetros relacionados às variáveis.

A Figura 4.24 ilustra as variáveis e atributos utilizados nos três modelos. Essas variáveis e atributos servem de elo entre o programa auxiliar em Visual Basic e os módulos do Arena.

4.6 SIMULAÇÃO DOS MODELOS

Com os três modelos prontos e as ordens de produção geradas, efetua-se a simulação propriamente dita. Antes de iniciar a simulação é necessário estabelecer alguns parâmetros do Arena, e um desses parâmetros é mostrado na Figura 4.25, que é o “*Run Setup*”, que corresponde ao local onde ajusta-se os parâmetros para o relatório do Arena e a simulação propriamente dita.

Pode-se ver que para cada simulação os valores referem-se a 10 replicações. O tempo apresentado no relatório é em minutos, e os valores apresentados consideram o modelo trabalhando 24 horas por dia, sem paradas.

Dados da simulação

Tipo de plano	Quantidade de lotes simulados	Tempo de chegada do prox lote
<input checked="" type="radio"/> Sem alternativa	<input type="radio"/> 50 lotes	<input type="radio"/> Baixo
<input type="radio"/> Com alternativa	<input type="radio"/> 200 lotes	<input type="radio"/> Alto

Planilha dados de entrada:

Cancelar OK

Figura 4.23 – Janela “dados da simulação”

Fonte: Autor

Variables	Attributes
SetupTorno	RESERVAR_MAQ4
SetupTornoCNC	RESERVAR_MAQ5
FilaTornoC1	TEMPO_NOVO
FilaTornoCNCC1	SEQUENCIA_NOVA
TempoEsperaPorLote	RESERVAR_MAQ1
FilaFurarC1	RESERVAR_MAQ2
FilaFresarC1	RESERVAR_MAQ3
FilaFresarCNCC1	MANTER_RESERVA
FresarC1.NumberIn	TempoProcessamentoTotal
FresarC1.NumberOut	NumeroPeca
FresarCNCC1.NumberIn	QuantidadeLote
FresarCNCC1.NumberOut	PROXIMA_ESTACAO
FurarC1.NumberIn	MaquinaSelecionada
FurarC1.NumberOut	TipoPlano
TotalLotes	TempoProcessamentoParcial
QuantidadePecas	TempoProcessamento
SetupFuradeira	SequenciaProcessamento
SetupFresadora	QuantidadeOperacoes
SetupCentroUsinagem	TotalOperacoes
TempoProximoLoteMin	Tempo
TempoProximoLoteMax	Sequencia
SomaQuantidadePecas	ApontadorOperacao
TempoTotalPorLote	IndiceOperacoes
	AlternativaSelecionada
	UltimaMaquina

Figura 4.24 – Variáveis e atributos dos modelos

Fonte: Autor

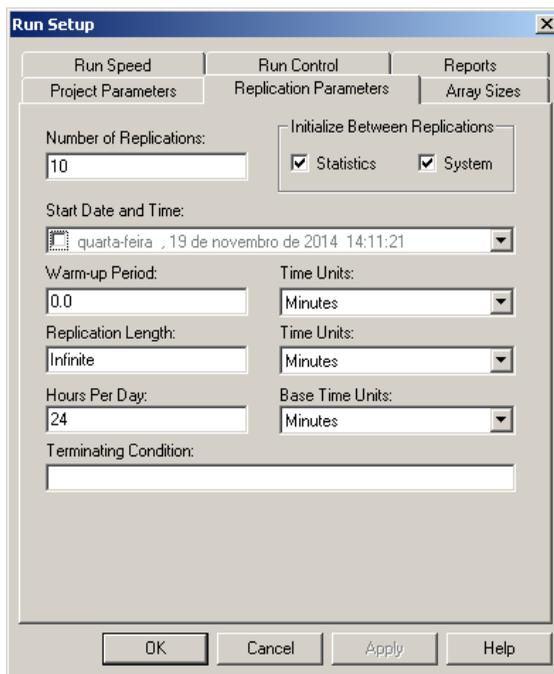


Figura 4.25 – Parâmetros para a simulação

Fonte: Autor

Definidos estes parâmetros, pode-se dar início à simulação. Com isso a janela apresentada na Figura 4.23 aparece e, além dos níveis de cada fator, deve-se definir o item “planilha de dados de entrada”, que corresponde à ordem de produção que foi gerada anteriormente no Excel.

Cada uma dessas 16 planilhas serviu de “planilha dados e entrada” para cada um dos três modelos. A Figura 4.26 apresenta a pasta lida pelo programa auxiliar do Visual Basic, o qual extrai os dados para a simulação.

Após definir os fatores de controle e escolhida a planilha de dados de entrada, inicia-se o processo de simulação. Durante os testes de simulação os modelos são simulados em uma velocidade baixa para poder visualizar possíveis falhas, e verificar se o modelo executa corretamente. Para essa etapa da simulação foram montadas animações para os três modelos, e as Figuras 4.27, 4.28 e 4.29 ilustram as 3 animações criadas para auxiliar a verificação dos modelos.

Nome	Data de modificaç...	Tipo	Tamanho
 S1	10/09/2014 22:59	Planilha do Microsoft Excel 97-2003	104 KB
 S2	10/09/2014 23:00	Planilha do Microsoft Excel 97-2003	104 KB
 S3	10/09/2014 23:03	Planilha do Microsoft Excel 97-2003	105 KB
 S4	10/09/2014 23:04	Planilha do Microsoft Excel 97-2003	104 KB
 S5	10/09/2014 23:05	Planilha do Microsoft Excel 97-2003	161 KB
 S6	10/09/2014 23:06	Planilha do Microsoft Excel 97-2003	162 KB
 S7	10/09/2014 23:07	Planilha do Microsoft Excel 97-2003	161 KB
 S8	10/09/2014 23:09	Planilha do Microsoft Excel 97-2003	161 KB
 S9	10/09/2014 23:11	Planilha do Microsoft Excel 97-2003	161 KB
 S10	10/09/2014 23:12	Planilha do Microsoft Excel 97-2003	162 KB
 S11	10/09/2014 23:23	Planilha do Microsoft Excel 97-2003	151 KB
 S12	10/09/2014 23:24	Planilha do Microsoft Excel 97-2003	150 KB
 S13	10/09/2014 23:25	Planilha do Microsoft Excel 97-2003	94 KB
 S14	10/09/2014 23:26	Planilha do Microsoft Excel 97-2003	93 KB
 S15	10/09/2014 23:27	Planilha do Microsoft Excel 97-2003	93 KB
 S16	10/09/2014 23:27	Planilha do Microsoft Excel 97-2003	93 KB
 Template	27/01/2014 15:52	Planilha do Microsoft Excel	51 KB
 Template1	27/01/2014 15:52	Planilha do Microsoft Excel	51 KB

Figura 4.26 – Pasta com os arquivos dados de entrada

Fonte: Autor

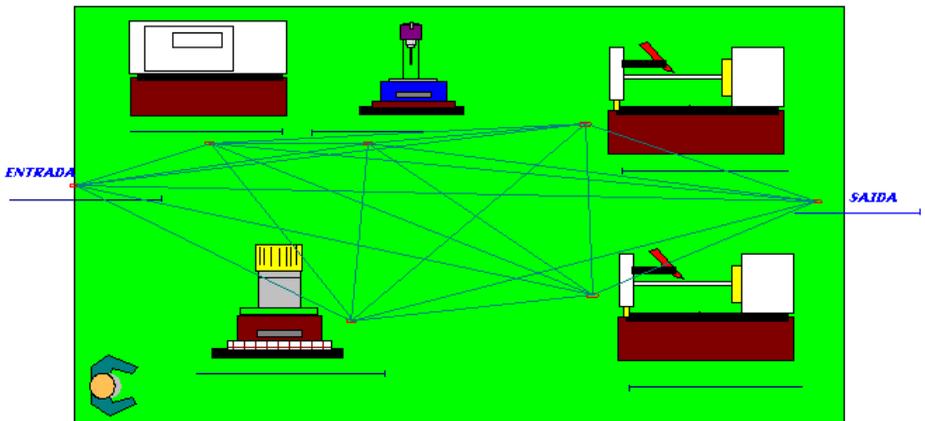


Figura 4.27 – Animação leiaute funcional

Fonte: Autor

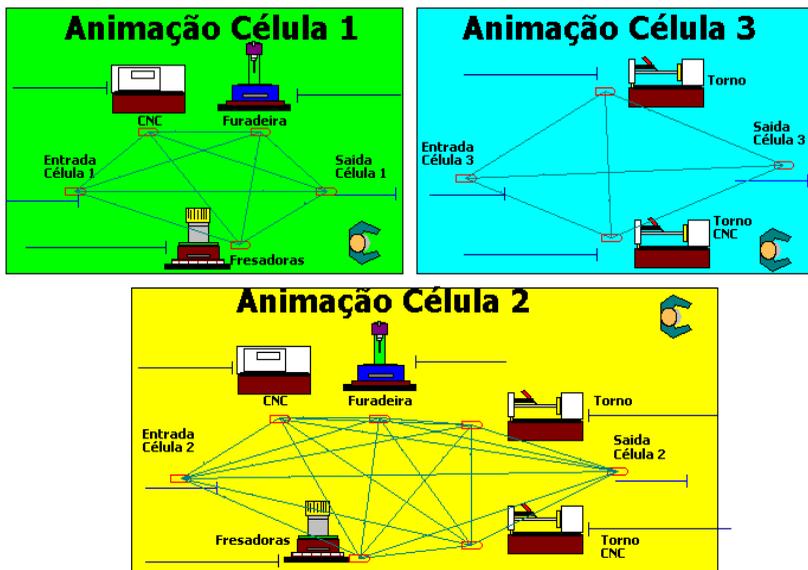


Figura 4.28 – Animação leiaute celular tradicional

Fonte: Autor

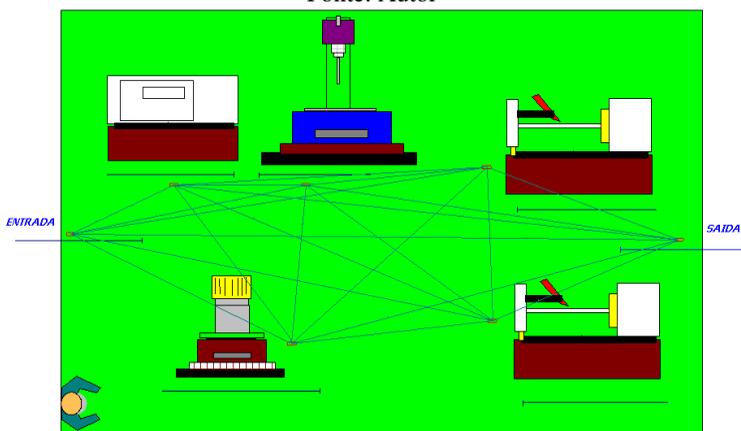


Figura 4.29 – Animação leiaute celular virtual

Fonte: Autor

Ao fim do processo de simulação abre-se uma janela questionando o usuário se ele deseja analisar o relatório de resultados. A Figura 4.30 ilustra o formato do relatório de dados, de onde serão extraídos os dados que serão utilizados para o cálculo das variáveis resposta.

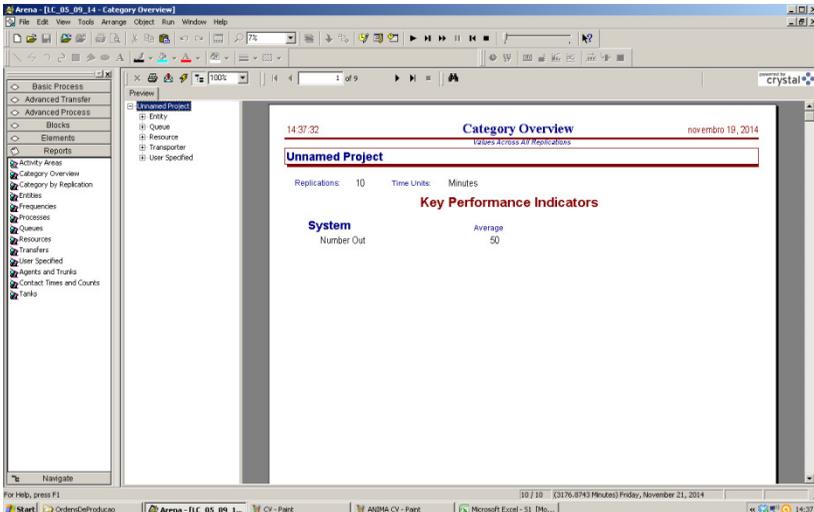


Figura 4.30 – Relatório com os dados de saída do Arena

Fonte: Autor

Em termos de tempo, a execução das simulações em média durou entre 20 a 300 segundos, dependendo da complexidade da ordem de cada uma das 16 ordens de produção. Se for considerado um valor médio de 160 segundos para executar cada simulação, tem-se $160 \text{ segundos} \times 768 \text{ combinações} = 122800 \text{ segundos}$, ou seja, aproximadamente 34 horas de simulação. O computador utilizado para a simulação foi um notebook ACER, modelo Aspire 4220, com um processador AMD Sempron e 1 MB de memória RAM.

Cada um dos 768 relatórios gerados foi exportado em formato Excel e gravado em uma pasta. Posteriormente foram compilados em uma única planilha de resultados para cada modelo. A Figura 4.31 ilustra a pasta com 256 resultados referentes ao leiaute celular virtual.

Para facilitar a compreensão e não haver enganos, utilizou-se a seguinte ordenação: para cada uma das 16 combinações de entrada, de “S1” a “S16”, eram possíveis mais 16 combinações. Portanto, para cada “S” havia 16 resultados “R”. No final, os 16 resultados referentes a planilha de entrada “S1” foram “R101”, “R102”, “R103”, ..., “R116”.

Após todas as 768 planilhas Excel serem geradas efetuou-se a compilação desses dados em uma planilha, para cada tipo de leiaute. Ou seja, as 256 planilhas mostradas na Figura 4.31 tornaram-se no final uma única planilha com todas as combinações e resultados das variáveis resposta.

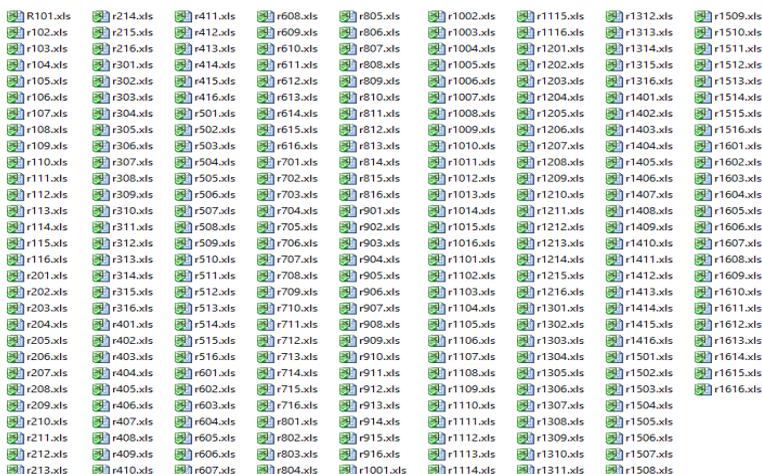


Figura 4.31 – Pasta com 256 resultados do modelo celular virtual

Fonte: Autor

A Figura 4.32 ilustra uma parte da planilha referente aos resultados das variáveis resposta do modelo celular virtual.

Mediante uma macro programada em Visual Basic Application, o botão “gravar resultados”, da Figura 4.32, abria cada uma das 256 planilhas, e copiava os dados que eram necessários ao cálculo das variáveis resposta. Assim, na primeira coluna é mostrada apenas a ordenação para confirmar as 256 linhas da planilha. Na segunda coluna é apresentada qual planilha “S” foi usada como base. Em seguida, na próxima coluna, são mostrados os nomes das 16 planilhas de resultados obtidas com a planilha “S”.

Nas demais colunas o sinal “-” indica o nível baixo daquele fator de controle, enquanto o sinal “+” representa o nível alto do fator de controle para aquela simulação.

As colunas que possuem os sinais de “-” e “+” são as colunas dos fatores de controle. As colunas que seguem referem-se aos dados que foram coletados nas planilhas de resultados do Arena. Elas foram utilizadas para calcular os valores das variáveis resposta.

Por fim, as planilhas “ResultadosJS.xlsm”, “ResultadosLC.xlsm” e “ResultadosCV.xlsm” são utilizadas como dados de entrada para o software Minitab, mediante o qual são efetuadas as análises estatísticas dos resultados obtidos com as simulações.

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	
		Gravar Resultados																											
nº	Plan Resultado	Feats Pega	Feats Duplic	Qde Pylate	Demanda	Tipo	Plano	Qde Sim	Tcheg	Tmanit	Total Peças	Nº Lotes	Tempo Final (min)	Tempo Final (h)	Produtividade (pç/h)	Vip. Entidades (pç/s)	Estoque Teorido (pç/s)	Utilização Máquinas (%)	Utilização Operações (%)	Utilização Abastece. (%)	Médis Utilização (%)	Tempo Espera (min)	Tempo Espera (h)	Lead Time (min)	Lead Time (h)				
1	S1 R101	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	2844.35	47.406	31.47	1.17	34.982	0.04	0.05	0.01	0.03	506.6	8.44	897.97	14.97				
2	S1 R102	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	2878.59	47.977	31.0985078	16.1241	481.14	0.50436	0.630452	0.105333	0.413338	507	8.45	901.07	15.02					
3	S1 R103	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	3185.59	63.093	23.6475791	6.65283	19.48	0.36566	0.045684	0.00785	0.30303	104.2	1.737	486.51	8.275					
4	S1 R104	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	3826.4	63.773	23.3953288	6.74933	20.14	0.38057	0.475718	0.08162	0.31264	100.5	1.674	492.91	8.215					
5	S1 R105	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200	8689.19	144.82	39.7252027	11.529	331.63	0.13652	0.170652	0.03018	0.11245	185.3	30.89	2219.4	36.99					
6	S1 R106	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200	8601.39	146.69	39.216806	51.1853	1472.3	0.60922	0.761527	0.13448	0.50173	1848	30.81	2215.5	36.92					
7	S1 R107	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200	11320.8	188.26	30.3965768	8.4589	72.2	0.13727	0.171592	0.03058	0.11315	108.6	1.809	476.92	7.949					
8	S1 R108	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	3566.62	56.11	26.590441	1.41348	42.178	0.40449	0.58775	0.10515	0.3877	100.4	1.674	466.56	7.776					
9	S1 R109	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	3539.84	60.864	24.5945068	18.4728	551.22	0.52925	0.661558	0.09893	0.42988	673.3	11.22	1100.5	18.34					
10	S1 R110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	3603.61	63.394	23.6355068	0.77451	23.111	0.04252	0.053151	0.00178	0.03449	151.3	2.521	590.54	9.842					
11	S1 R111	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	4008.65	66.811	22.3316873	7.89337	235.54	0.43784	0.547303	0.08132	0.35549	143.3	2.388	578.49	9.642					
12	S1 R112	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	9609.53	163.49	35.1882295	13.9838	402.24	0.1556	0.194496	0.03004	0.12671	2291	38.18	2693.6	44.89					
13	S1 R113	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5753	200	9574.91	159.58	36.0504736	61.006	1754.8	0.67681	0.846018	0.13041	0.55108	2304	38.4	2707.2	45.12				
14	S1 R114	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5753	200	11787.2	186.45	29.2843054	2.7484	79.086	0.15689	0.196113	0.03049	0.12763	117.1	1.952	523.18	8.72				
15	S1 R115	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5753	200	11577.2	192.95	29.815437	9.19697	263.4	0.53296	0.666197	0.10442	0.43453	105.4	1.757	508.18	8.47				
16	S1 R116	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5753	200	11577.2	192.95	29.815437	9.19697	263.4	0.53296	0.666197	0.10442	0.43453	105.4	1.757	508.18	8.47				
17	S2 R201	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1496	50	3248.49	54.142	27.6312833	1.2425	37.176	0.03474	0.04342	0.00771	0.02862	574.5	9.575	952.19	15.87				
18	S2 R202	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1496	50	3261.61	54.396	27.5201655	15.3852	460.32	0.42541	0.531767	0.09399	0.35039	587.3	9.788	966.33	16.11				
19	S2 R203	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1496	50	3581.87	59.698	25.0595559	0.64858	19.405	0.03484	0.043551	0.00782	0.02874	117.4	1.907	493.22	8.22				
20	S2 R204	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1496	50	3589.64	59.811	25.0122428	7.14025	213.84	0.38495	0.481185	0.06875	0.31763	111.1	1.852	489.7	8.162				
21	S2 R205	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6251	200	10524	175.4	35.638403	14.2314	444.8	0.14472	0.180888	0.0299	0.11851	2360	39.33	2741.5	45.69				
22	S2 R206	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6251	200	10557.3	175.96	35.5259984	53.6482	1676.8	0.54063	0.675786	0.11441	0.44261	2389	39.82	2771	46.18				
23	S2 R207	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6251	200	12412.9	206.83	30.0195581	2.61426	81.709	0.1443	0.180375	0.03061	0.11843	116.2	1.936	497.07	8.285				
24	S2 R208	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6251	200	12468.9	207.83	30.0773293	8.38434	262.05	0.4592	0.573995	0.0947	0.37689	119.8	1.997	500.97	8.35				
25	S2 R209	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1496	50	2528.25	48.804	30.6553122	1.21395	36.321	0.03847	0.048081	0.00772	0.03143	522.6	8.711	930.14	15.5				

Figura 4.32 – Planilha com os resultados das simulações do leiaute celular virtual
Fonte: Autor

4.7 VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

Esta etapa da pesquisa apresenta a verificação e validação dos modelos, cujos aspectos foram verificados para auferir a consistência dos mesmos. Entre outras técnicas, foram empregados na validação modelos determinísticos, variações sobre os dados de entrada e o uso de rotinas de rastreamento.

4.7.1 Verificação dos modelos

Neste trabalho foram utilizadas técnicas de verificação indicadas por Freitas Filho (2008). Em particular o emprego de valores constantes, de forma que os modelos passem a ser determinísticos e, assim, se possa verificar os resultados obtidos.

Além disso, realizaram-se também variações sobre os dados de entrada para avaliar o desempenho do modelo com diversos parâmetros. Por último, procedeu-se uma rastreabilidade (*trace*) de vários procedimentos.

Um importante item verificado nos três modelos é o roteiro de fabricação e, para isso, foram feitas simulações para verificar se os modelos estavam funcionando com relação ao sequenciamento, considerando-se os lotes nos departamentos, máquinas ou células especificadas. O objetivo foi verificar se não havia nenhum erro de lógica nos modelos quanto à modelagem no Arena.

Para isso, utilizou-se a técnica *trace*. Verificou-se se as entidades percorriam a sequência correta de máquinas e operações, sequências essas que foram previstas no padrão adotado e definidos na metodologia.

Outros fatores importantes verificados também foram os tempos de movimentação dos abastecedores, tempos de *setup* de máquina e o processamento propriamente dito.

Outra vez, mediante o *trace* procurou-se apurar se a modelagem dos três leiautes não apresentava erros de lógica. Assim, verificou-se se valores reais, propostos para os tempos de processamento e movimentação estavam dentro do modelo adotado. Assim, buscou-se garantir a veracidade dos dados contidos no modelo, e garantir que os resultados obtidos foram fiéis ao que foi inicialmente proposto.

O apêndice III ilustra uma parte do rastreamento (*trace*) de uma simulação do modelo leiaute celular virtual.

4.7.2 Validação

Freitas Filho (2008) enuncia que a validação consiste em assegurar que o modelo e os inúmeros pressupostos e simplificações adotados no desenvolvimento do modelo, se implementados de forma correta, produzam resultados semelhantes ao observado no sistema real.

Ainda, segundo Freitas Filho (2008), vale ressaltar que são poucas as oportunidades em que se constrói um modelo que atue de forma idêntica ao sistema real. Na maioria das vezes, o modelo visa a análise de condições diferentes ao que o sistema real está sujeito, ou ainda, o modelo representa um sistema que não existe na realidade.

Na maioria das vezes o que se busca com o modelo é verificar o desempenho de inúmeras e diversificadas alternativas para um novo projeto. Mesmo que exista um sistema real, são poucas as possibilidades para a realização de comparações detalhadas.

Portanto, a questão da validação de modelos é importante, mas deve-se ter sempre em mente suas limitações. O importante é que se faça um delineamento das principais situações sob as quais se deseja avaliar o comportamento do modelo. O objetivo principal é aumentar a confiança nos resultados apresentados pelo modelo (FREITAS FILHO, 2008).

Os modelos propostos nesta pesquisa não reproduzem um sistema real. Uma das técnicas utilizadas nesta pesquisa foi o *brainstorming meeting*, ou seja, reuniões semanais com o Prof. Fernando Martineli Loureiro durante o tempo de construção dos modelos.

Com isso discutiu-se todas as questões que envolvem os parâmetros e simplificações adotadas nos modelos.

5 RESULTADOS

Este capítulo divide-se em duas partes: na primeira são levantados os principais resultados obtidos para cada tipo de leiaute, na segunda parte é tratada a comparação entre os leiautes, e será verificado em quais situações cada leiaute se adequa melhor.

5.1 RESULTADOS PARA O LEIAUTE FUNCIONAL

Nesta etapa são ilustrados os resultados obtidos com a simulação do modelo funcional, apresentando quais fatores tiveram maior influência sobre cada uma das seis variáveis resposta de acordo com o grau de impacto obtido no gráfico de Pareto conforme Apêndice VI.

Será utilizado para esta etapa o gráfico para os principais efeitos causados pelos fatores de controle em cada variável resposta. Para isso, utilizou-se o Software Minitab.

5.1.1 Variável resposta tempo final (horas)

Nota-se no gráfico da Figura 5.1 que os principais fatores que influenciam o tempo final em ordem de impacto para o leiaute funcional foram, a quantidade de peças por lote, a quantidade de *features* por peça, quantidade de *features* duplicadas, a quantidade de lotes simulados e, de forma um pouco mais discreta, o tempo de chegada entre os lotes. Percebe-se também que o nível alto de cada um dos fatores acima causou um aumento no tempo final.

5.1.2 Variável resposta produtividade (peças/hora)

O gráfico da Figura 5.2 ilustra que os principais fatores responsáveis pela queda da produtividade por ordem de impacto no leiaute funcional foram: a quantidade de *features* por peça, a quantidade de *features* duplicadas, a interação entre a quantidade de *features* por peça e a quantidade de *features* duplicadas, e o tempo de chegada entre os lotes. Já se vê um pequeno crescimento na produtividade com relação aos fatores quantidade de peças por lote e quantidade de lotes simulados.

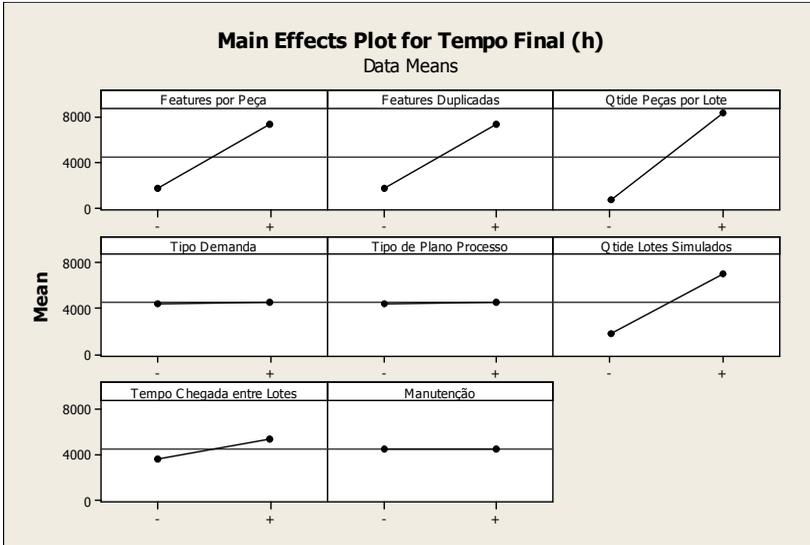


Figura 5.1 – Gráfico de efeito no tempo final do leiaute funcional

Fonte: Autor

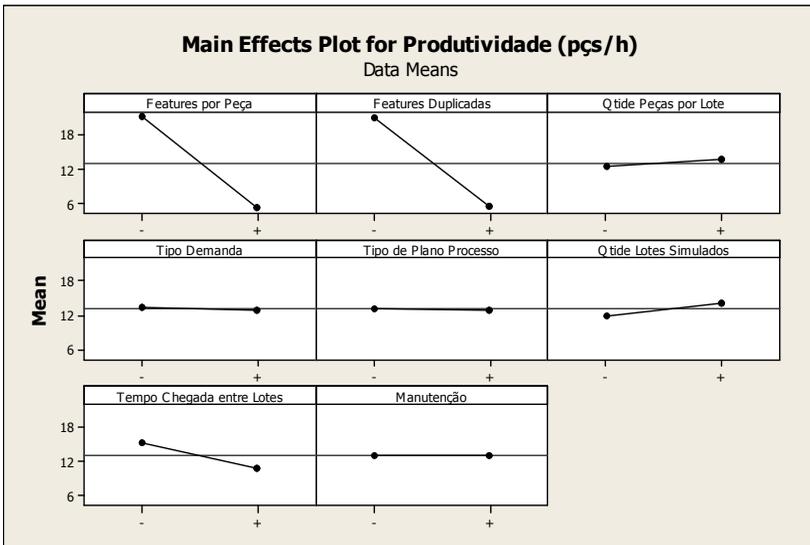


Figura 5.2 – Gráfico de efeito na produtividade do leiaute funcional

Fonte: Autor

5.1.3 Variável resposta estoque médio em processo (peças)

A Figura 5.3 ilustra em ordem de impacto, que os fatores quantidade de peças por lote, tempo de chegada entre os lotes foi responsável por reduzir o estoque à medida que seu nível alto foi introduzido ao sistema, a interação entre o tempo de chegada e a quantidade de peças por lote, e quantidade de lotes simulados.

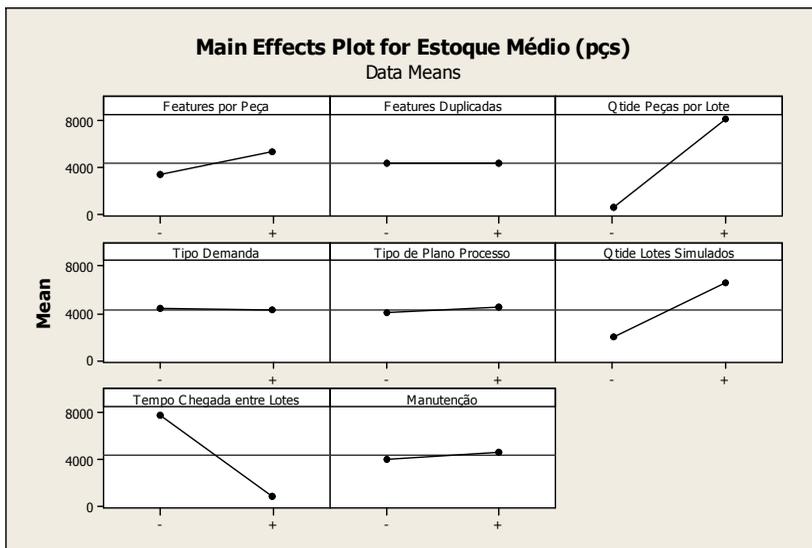


Figura 5.3 – Gráfico de efeito no estoque em processo do leiaute funcional

Fonte: Autor

5.1.4 Variável resposta utilização dos recursos (%)

Na Figura 5.4 pode-se observar que os fatores, por ordem de impacto que mais influenciaram a utilização dos recursos foram: manutenção, tempo de chegada entre os lotes, a interação de peças por lote e a manutenção, quantidade de lotes simulados, quantidade de peças por lote e tipo de plano de processo.

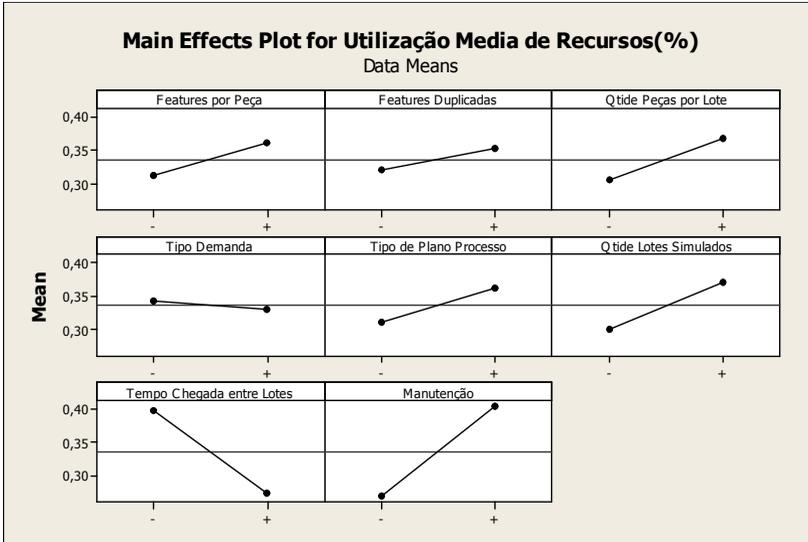


Figura 5.4 – Gráfico de efeito na utilização dos recursos do leiaute funcional
Fonte: Autor

5.1.5 Variável resposta tempo total de espera (horas)

Observa-se na Figura 5.5 que as variáveis tempo total de espera e *lead time* têm comportamentos bem parecidos na análise da influência dos fatores de controle.

Os fatores que mais influenciam, em ordem de impacto, são o tempo de chegada entre lotes, a quantidade de peças por lote, a iteração entre tempo de chegada e quantidade de peças por lote, *features* por peça, a quantidade de *features* duplicadas, e a quantidade de lotes simulados.

5.1.6 Variável resposta *lead time* (horas)

Na Figura 5.6 pode-se observar os principais fatores de controle que influenciam o *lead time*, por ordem de impacto são: a quantidade de peças por lote, o tempo de chegada entre os lotes, *features* por peça, iteração entre quantidade de peças por lote e tempo de chegada entre os lotes.

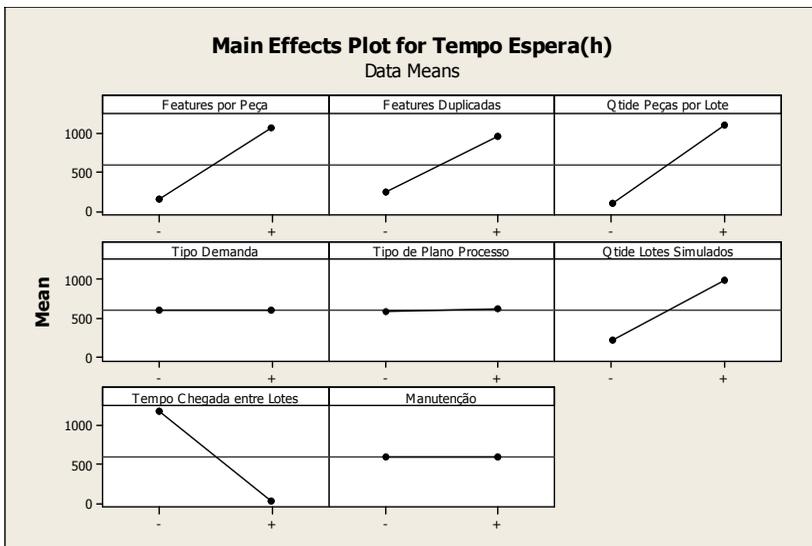


Figura 5.5 – Gráfico de efeito do tempo total de espera do leiaute funcional
Fonte: Autor

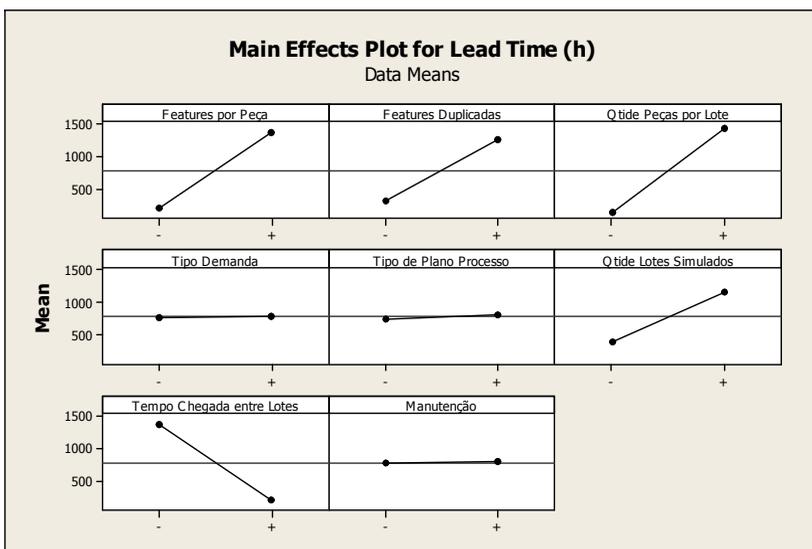


Figura 5.6 – Gráfico de efeito do *lead time* do leiaute funcional
Fonte: Autor

5.2 RESULTADOS PARA O LEIAUTE CELULAR

Nesta etapa são ilustrados os resultados obtidos com a simulação do modelo celular, apresentando quais fatores tiveram maior influência sobre cada uma das seis variáveis resposta de acordo com o grau de impacto obtido no gráfico de Pareto conforme Apêndice VII.

5.2.1 Variável resposta tempo final (horas)

A Figura 5.7 apresenta os fatores de controle que mais influenciaram o tempo final para o leiaute celular tradicional. Por ordem de impacto: quantidade de peças por lote, *features* por peça, *features* duplicadas e quantidade de lotes simulados.

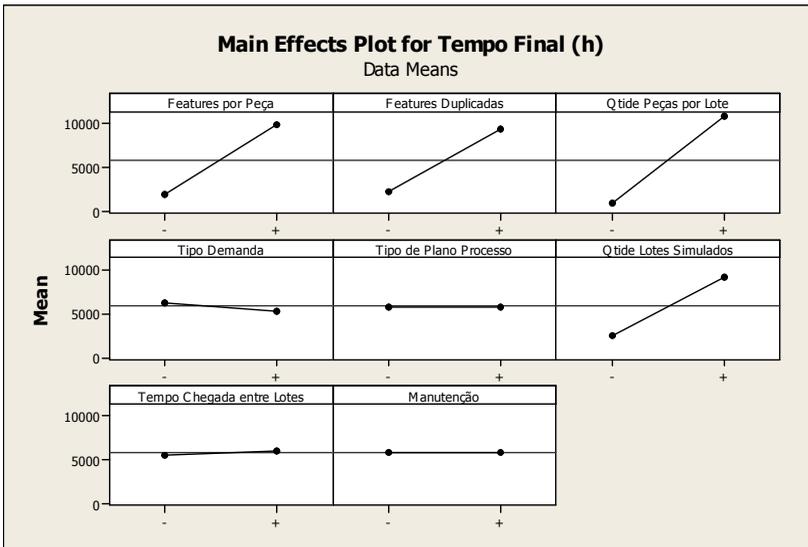


Figura 5.7 – Gráfico de efeito do tempo final do leiaute celular tradicional

Fonte: Autor

5.2.2 Variável resposta produtividade (peças/hora)

O gráfico da Figura 5.8 ilustra que os principais fatores responsáveis por afetar a produtividade do leiaute celular em ordem de impacto são: a quantidade de *features* por peça, a quantidade de *features* duplicadas, a iteração entre as *features* por peça e *features* duplicadas, tempo de chegada entre os lotes e tipo de demanda.

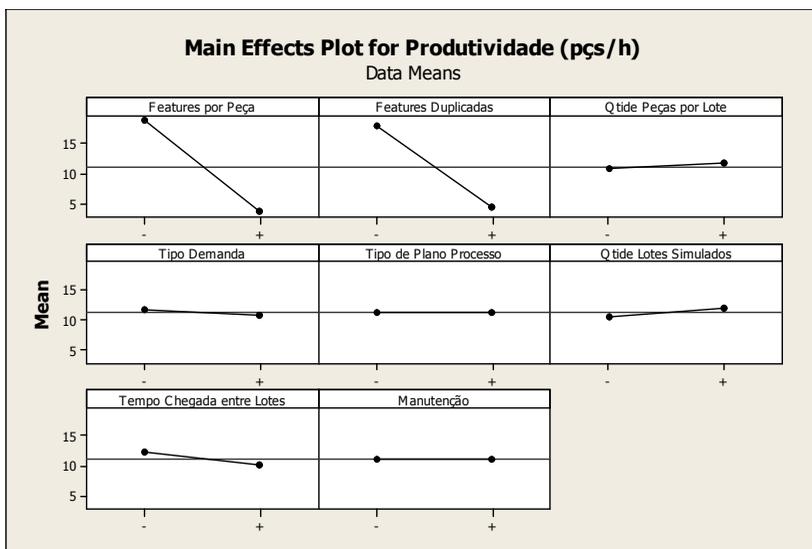


Figura 5.8– Gráfico de efeito da produtividade do leiaute celular tradicional

Fonte: Autor

5.2.3 Variável resposta estoque médio em processo (peças)

A Figura 5.9 ilustra que os fatores quantidade de peças por lote, tempo de chegada entre os lotes, quantidade de lotes simulados, a iteração entre quantidade de peças por lote e tempo de chegada entre lotes, *features* por peça foram responsáveis pelo aumento do estoque médio em processo em ordem de impacto.

5.2.4 Variável resposta utilização dos recursos (%)

Na Figura 5.10 pode-se observar que os fatores manutenção, iteração entre quantidade de peças por lote e manutenção, quantidade de lotes simulados, iteração entre *features* por peça e manutenção, iteração *features* por peça e tipo de demanda, quantidade de peças por lote e tempo de chegada entre os lotes, influenciaram, por ordem de impacto a utilização dos recursos.

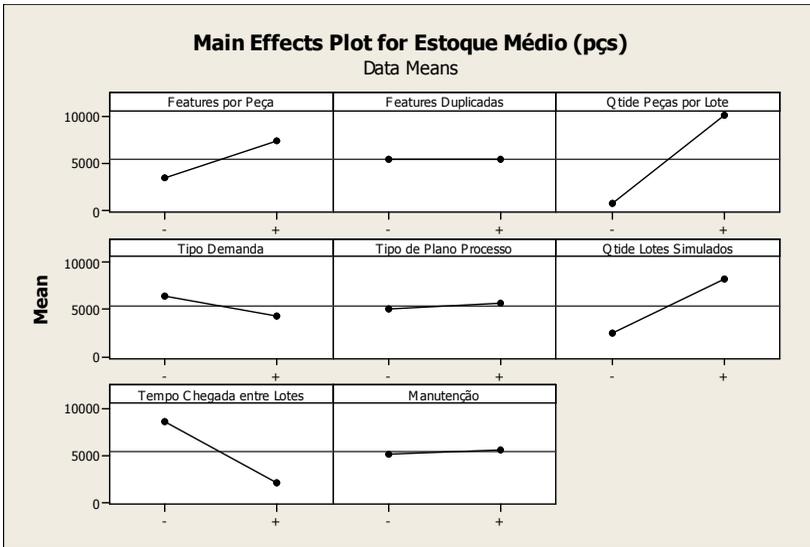


Figura 5.9 – Gráfico de efeito do estoque médio do leiaute celular tradicional

Fonte: Autor

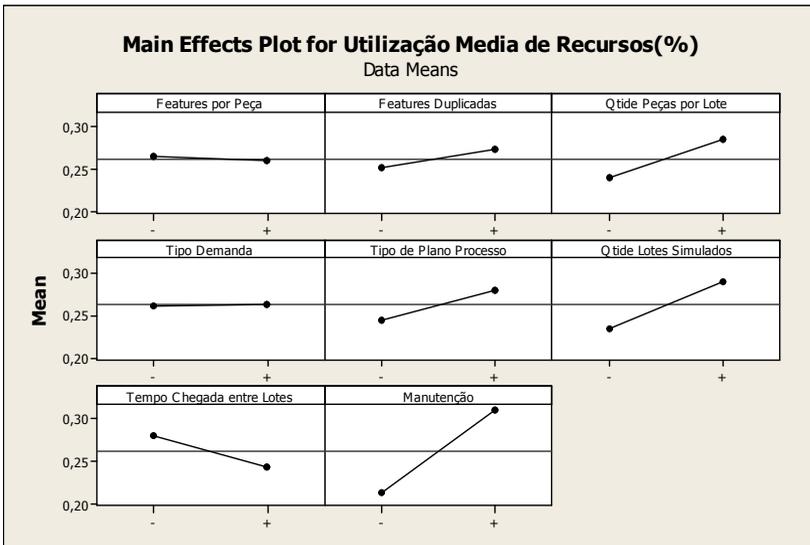


Figura 5.10 – Gráfico de efeito da utilização dos recursos do leiaute celular

Fonte: Autor

5.2.5 Variável resposta tempo total de espera (horas)

Observa-se na Figura 5.11 que as variáveis tempo total de espera e *lead time* têm comportamentos bem parecidos na análise da influência dos fatores de controle.

Os fatores que mais influenciaram, por ordem de impacto, o tempo de espera dos lotes durante o processamento são a quantidade de *features* por peça, a quantidade de peças por lote, a iteração entre quantidade de *features* e quantidade de peças por lote, tempo de chegada entre lotes, *features* duplicadas e quantidade de lotes simulados.

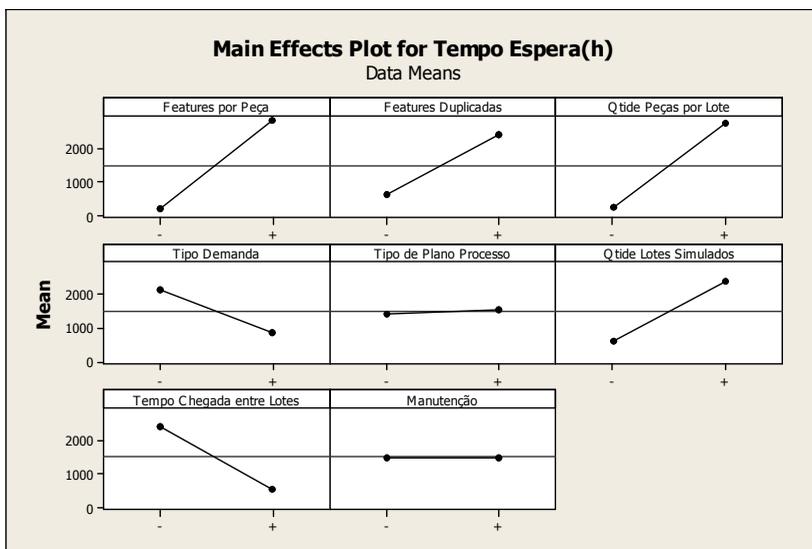


Figura 5.11 – Gráfico de efeito do tempo total de espera do leiaute celular

Fonte: Autor

5.2.6 Variável resposta *lead time* (horas)

Na Figura 5.12 pode-se observar os principais fatores de controle que influenciam o *lead time*, por ordem de impacto são: a quantidade de *features* por peça, a quantidade de peças por lote, a iteração entre quantidade de *features* e quantidade de peças por lote, *features* duplicadas, tempo de chegada entre lotes e quantidade de lotes simulados.

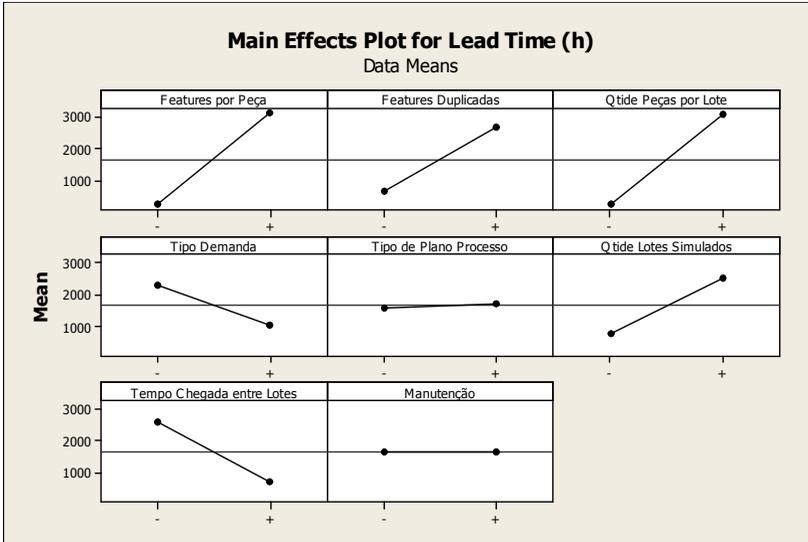


Figura 5.12 – Gráfico de efeito do *lead time* do leiaute celular tradicional
Fonte: Autor

5.3 RESULTADOS PARA O LEIAUTE CELULAR VIRTUAL

Nesta etapa são ilustrados os resultados obtidos com a simulação do modelo celular virtual, apresentando quais fatores tiveram maior influência sobre cada uma das seis variáveis resposta de acordo com o grau de impacto obtido no gráfico de Pareto conforme Apêndice VIII.

5.3.1 Variável resposta tempo final (horas)

Nota-se no gráfico da Figura 5.13 que os principais fatores que influenciam o tempo final para o leiaute celular virtual foram, em ordem de impacto: a quantidade de peças por lote, a quantidade de *features* por peça, quantidade de *features* duplicadas, a quantidade de lotes simulados.

5.3.2 Variável resposta produtividade (peças/hora)

O gráfico da Figura 5.14 ilustra que os principais fatores que influenciaram a produtividade do leiaute celular virtual, em ordem de impacto são: a quantidade de *features* por peça, a quantidade de *features* duplicadas, a interação entre quantidade de *features* e *features* duplicadas, tempo de chegada entre os lotes e quantidade de lotes simulados.

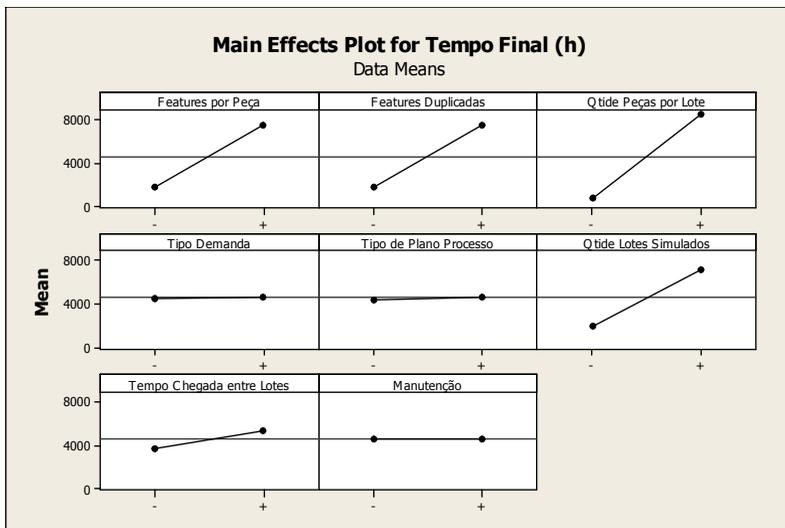


Figura 5.13 – Gráfico de efeito do tempo final do leiaute celular virtual
Fonte: Autor

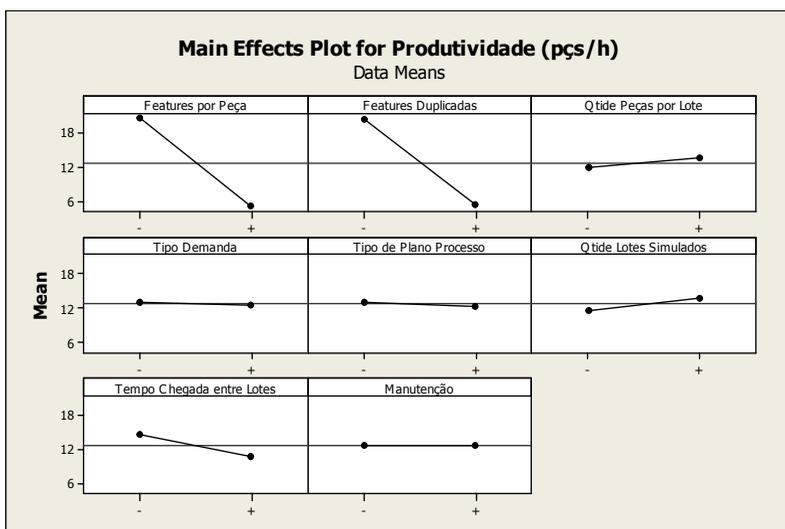


Figura 5.14 – Gráfico de efeito da produtividade do leiaute celular virtual
Fonte: Autor

5.3.3 Variável resposta estoque médio em processo (peças)

A Figura 5.15 ilustra que os fatores *features* por peça, quantidade de peças por lote, tempo de chegada entre os lotes, a iteração entre quantidade de peças por lote e tempo de chegada, quantidade de lotes simulados, iteração entre quantidade de lotes simulados e tempo de chegada entre lotes.

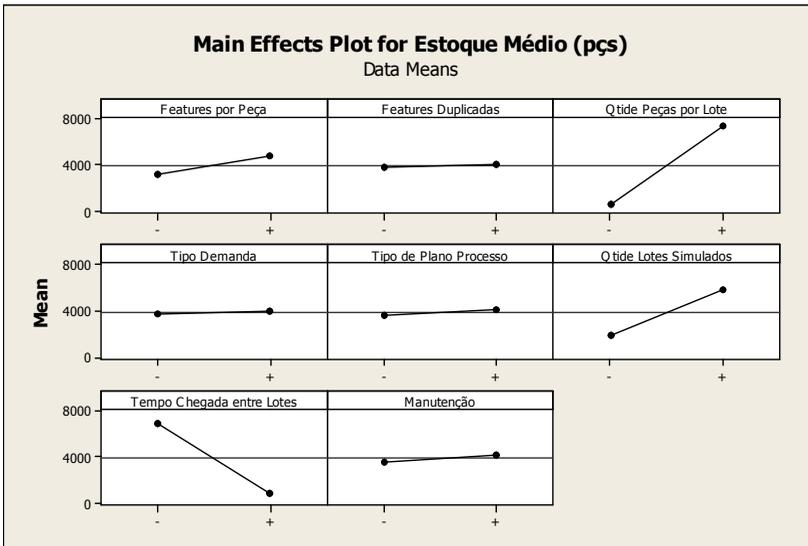


Figura 5.15 – Gráfico de efeito do estoque médio do leiaute celular virtual
Fonte: Autor

5.3.4 Variável resposta utilização dos recursos (%)

Na Figura 5.16 pode-se observar que os fatores manutenção, tempo de chegada entre lotes, a iteração entre quantidade de peças e manutenção, quantidade de lotes simulados, quantidade de peças por lote, *features* por peça e tipo de plano de processo, são os fatores que mais influenciaram a utilização dos recursos no leiaute celular virtual, em ordem de impacto.

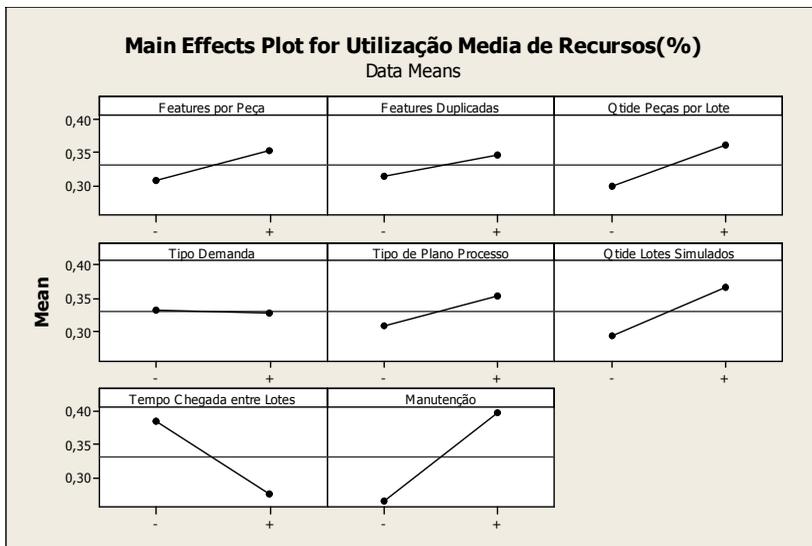


Figura 5.16– Gráfico de efeito da utilização de recursos do leiaute celular virtual

Fonte: Autor

5.3.5 Variável resposta tempo total de espera (horas)

Observa-se na Figura 5.17 que os fatores que mais influenciaram o tempo total de espera, em ordem de impacto foram: o tempo de chegada entre lotes, a quantidade de peças por lote, a iteração entre quantidade de peças por lote e tempo de chegada entre lotes, a quantidade de *features* por peça.

5.3.6 Variável resposta *lead time* (horas)

Na Figura 5.18 pode-se observar os principais fatores de controle que influenciam o *lead time*, por ordem de impacto foram: quantidade de peças por lote, *features* por peça, tempo de chegada entre lotes, quantidade de *features* duplicadas e a iteração entre a quantidade de *features* por peça e a quantidade de peças por lote.

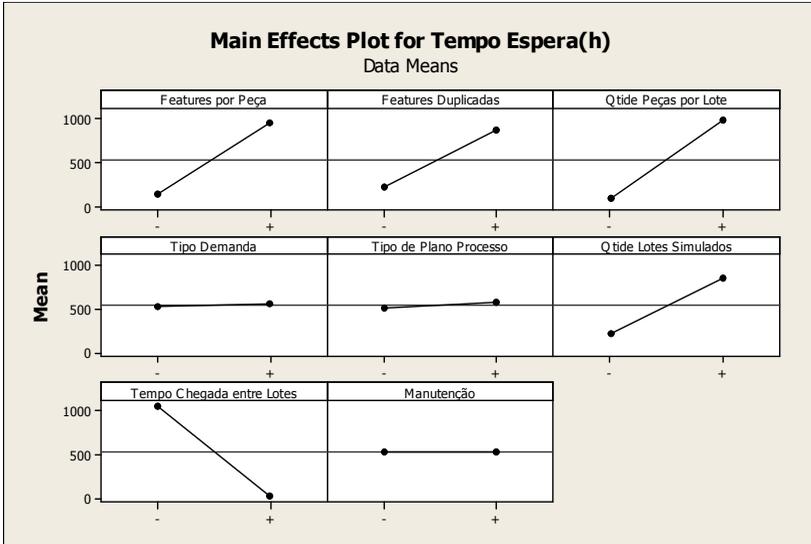


Figura 5.17– Gráfico de efeito do tempo total de espera do leiaute celular virtual
 Fonte: Autor

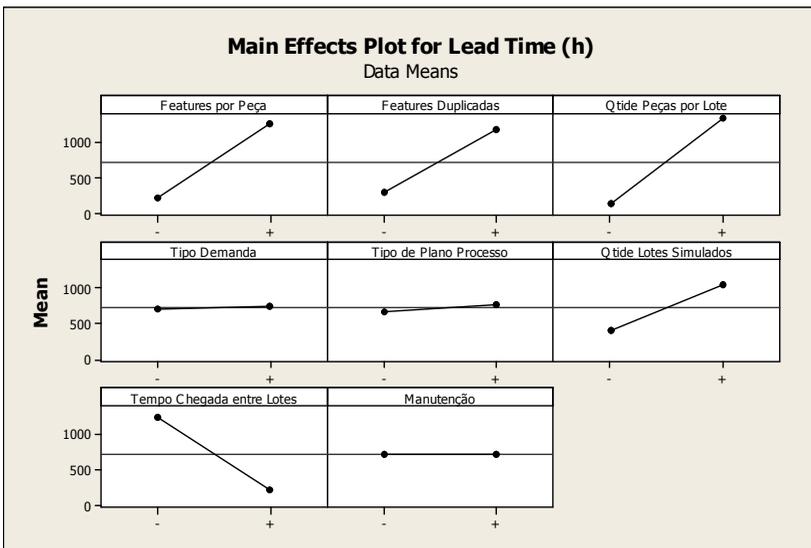


Figura 5.18– Gráfico de efeito do lead time do leiaute celular virtual
 Fonte: Autor

5.4 OBSERVAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS DE CADA LEIAUTE

Finalizando essa primeira etapa da análise dos resultados, pode-se observar que os resultados dos principais efeitos para os três tipos de leiautes diferentes são de certa forma semelhantes.

Visando facilitar a compreensão dos resultados, um resumo é apresentado no quadro 5.1, através do qual é ilustrada a relação entre cada fator de controle com as variáveis resposta, de acordo com cada leiaute. Deve-se mencionar que a análise de significância estatística foi feita através do cálculo da ANOVA, com o valor P calculado para o nível de significância de 0,05.

Para a variável resposta tempo final (h) os leiautes funcional e celular virtual tiveram comportamento muito semelhante, mesmo considerando a diferença de escalas dos gráficos. Eles diferem do leiaute celular tradicional no fator tipo de demanda, onde o funcional e o celular virtual têm um ligeiro aumento no tempo final quando o tipo de demanda passa a ser controlado.

Já o celular tradicional possui comportamento inverso, mostrando que o objetivo de formar células dedicadas se torna atraente. Contudo o valor médio do leiaute celular tradicional foi de 5000h, enquanto que o valor médio do celular virtual foi de 4000h, uma diferença considerável.

Para a variável produtividade (peças/h), os três leiautes tiveram comportamentos bem semelhantes. Porém o valor médio encontrado para o leiaute celular virtual foi superior ao do leiaute celular tradicional. Isto se dá muito em função da complexidade dos lotes de peças. Em função da aleatoriedade na formação desses lotes, através da combinação aleatória de *features*.

A variável estoque médio em processo (peças) apresenta como fator de controle decisivo entre os três leiautes o tipo de demanda, mais uma vez evidenciando que a formação das células dedicadas ao tipo de demanda é positivo. Entretanto o valor médio do leiaute celular virtual, mais uma vez foi menor do que o celular tradicional. Assinalando que apesar da grande variação do tipo de demanda o comportamento do celular virtual foi mais estável.

Para a variável utilização dos recursos (%) o leiaute celular virtual teve um desempenho em torno de 5 a 10% superior ao leiaute celular tradicional para alguns fatores.

O leiaute celular virtual teve um ligeiro ganho no fator tempo de chegada entre lotes. Ou seja, com relação ao funcional, ele teve uma variação menor, quando aumentado o nível desse fator.

Já para o fator tipo de demanda, o celular virtual se mostrou melhor que o funcional e o celular tradicional. Ou seja, ele se mostrou mais eficiente quando foi alterado o nível desse fator, mostrando que o leiaute celular virtual realmente pode apresentar as qualidades de ambos leiautes, tanto do celular como do funcional.

Outro fator importante a se ressaltar é o aumento na utilização dos recursos quando os sistemas foram geridos com um plano de manutenção, que deixou as máquinas sempre disponíveis. Isso mostra que a manutenção é um fator muito importante para os sistemas produtivos.

A variável resposta tempo total de espera (horas) também teve diferentes resultados para os três leiautes apresentados.

Pode-se verificar em alguns fatores a existência de controvérsia nos resultados. Em um primeiro momento, deve-se observar a escala do gráfico, o qual para o leiaute celular virtual e funcional é de 1000 horas, já para o leiaute celular é de 2000 horas. Ou seja, apesar da inclinação das retas dos três gráficos estarem parecidas, a escala mostra que a variação de valores é bem superior. Dentro disso o leiaute celular virtual teve um valor médio de tempo de espera melhor que os outros dois leiautes.

Por fim, para a variável *lead time*, que corresponde a todo o tempo que agregou valor ao modelo, apresentou resultados bem semelhantes para os três modelos.

Novamente ao analisar-se as escalas, observa-se que o leiaute celular virtual foi o que sofreu menos variações quando alterados os níveis de cada fator. Isto deve ser visto como um ponto positivo, mostrando que este tipo de leiaute pode suportar melhor as variações de alguns fatores.

Quadro 5.1 – Comparação Fatores de controle X variáveis resposta em cada tipo de leiaute

Fonte: Autor

	Variáveis Resposta																	
	Tempo Final (h)			Produtividade (pçs/h)			Estoque Médio em Processo (pçs)			Utilização dos Recursos (%)			Tempo Total de Espera (h)			Lead Time (h)		
Fatores de Controle	JS	C	CV	JS	C	CV	JS	C	CV	JS	C	CV	JS	C	CV	JS	C	CV
Features por peça	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	ns	s	s	s	s	s	s	s
Features duplicadas	s	s	s	s	s	s	ns	ns	ns	s	s	s	s	s	s	s	s	s
Qtde peças por Lote	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s
Tipo de demanda	ns	ns	ns	ns	s	s	ns	s	ns	s	ns	ns	ns	s	ns	ns	s	ns
Tipo de plano processo	ns	ns	ns	ns	ns	s	ns	ns	s	s	s	s	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Qtde lotes simulados	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s
Tempo Cheg entre lotes	s	ns	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s
Manutenção	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	s	s	s	s	ns	ns	ns	ns	ns	ns

JS - leiaute *job shop*; C - leiaute celular e
CV - leiaute celular virtual

s - com significância estatística
ns - sem significância estatística

5.5 COMPARAÇÃO DOS LEIAUTES

Nessa segunda etapa de análise de resultados inseriu-se o tipo de leiaute como um fator de controle e verificou-se como as variáveis resposta se comportaram com relação ao tipo de leiaute. O quadro 5.2 ilustra como ficou a relação fator de controle X variável resposta, e essa análise de significância estatística baseou-se no valor P encontrado no cálculo da análise de variância, e comparado com o valor P estimado no DOE, o qual era um nível de significância de 0,05. O apêndice V apresenta as tabelas das análises de variância.

Quadro 5.2 – Comparação Fatores de controle X variáveis resposta
 Fonte: Autor

Fatores de Controle	Variáveis Resposta					
	Tempo Final (h)	Produtividade (pçs/h)	Estoque Médio em Processo (pçs)	Utilização dos Recursos (%)	Tempo Total de Espera (h)	Lead Time (h)
Tipo de Leiaute	s	s	s	s	s	s
Features por peça	s	s	s	s	s	s
Features duplicadas	s	s	ns	s	s	s
Qtide peças por Lote	s	s	s	s	s	s
Tipo de demanda	ns	ns	ns	ns	s	s
Tipo de plano processo	ns	ns	ns	s	ns	ns
Qtide lotes simulados	s	s	s	s	s	s
Tempo Cheg entre lotes	s	s	s	s	s	s
Manutenção	ns	ns	ns	s	ns	ns

s - com significância estatística
 ns - sem significância estatística

O quadro 5.2 apresenta que o tipo de leiaute, como fator de controle, possui significância estatística com todas as variáveis resposta. Ressalta-se aqui que o fator de controle tipo de leiaute possui três níveis: nível funcional, o celular tradicional e o celular virtual.

Com relação ao tempo final, a Figura 5.19 ilustra que o leiaute celular teve um aumento significativo com relação aos leiautes funcional (funcional) e celular virtual. Já a Figura 5.20 relaciona a produtividade com relação ao leiaute, apresentando novamente um desempenho superior por parte dos leiautes funcional e celular virtual em relação ao celular tradicional.

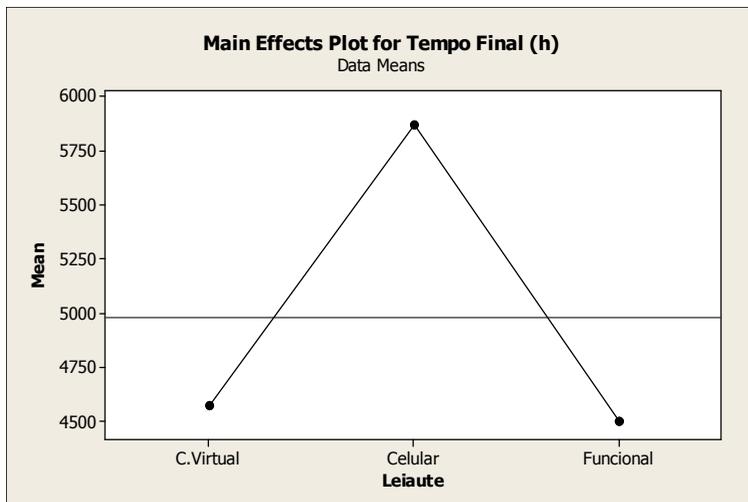


Figura 5.19 – Gráfico de efeito do tempo final no leiaute

Fonte: Autor

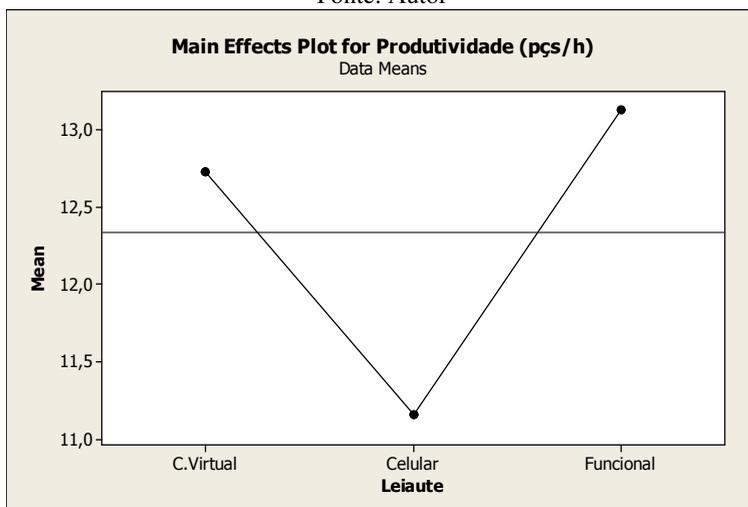


Figura 5.20 – Gráfico de efeito da produtividade no leiaute

Fonte: Autor

Na Figura 4.21 é apresentado como o leiaute se comportou com relação ao estoque médio em processo. Nessa variável resposta, os leiautes funcional e celular virtual novamente apresentam desempenho

superior, aqui mostrando que o celular virtual foi ainda melhor do que o funcional.

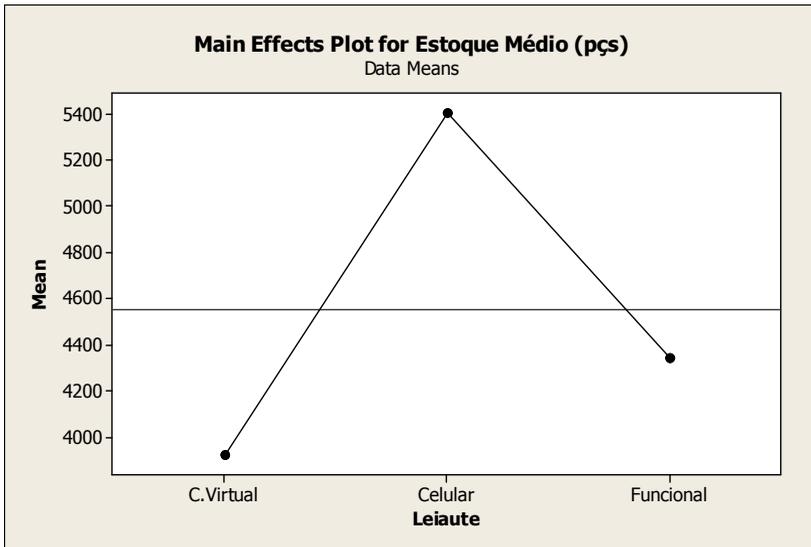


Figura 5.21 – Gráfico de efeito do estoque médio no leiaute

Fonte: Autor

A Figura 4.22 ilustra o comportamento do fator de controle tipo de leiaute quanto à variável resposta utilização média dos operadores. A figura ilustra que neste quesito os níveis funcional e celular virtual novamente tiveram um desempenho superior ao celular tradicional.

A Figura 4.23 e a Figura 4.24 ilustram o comportamento do leiaute com relação às variáveis tempo de espera e *lead time*, respectivamente. Observa-se um comportamento bem semelhante para ambos os casos, onde novamente o celular virtual e o funcional tiveram um desempenho superior.

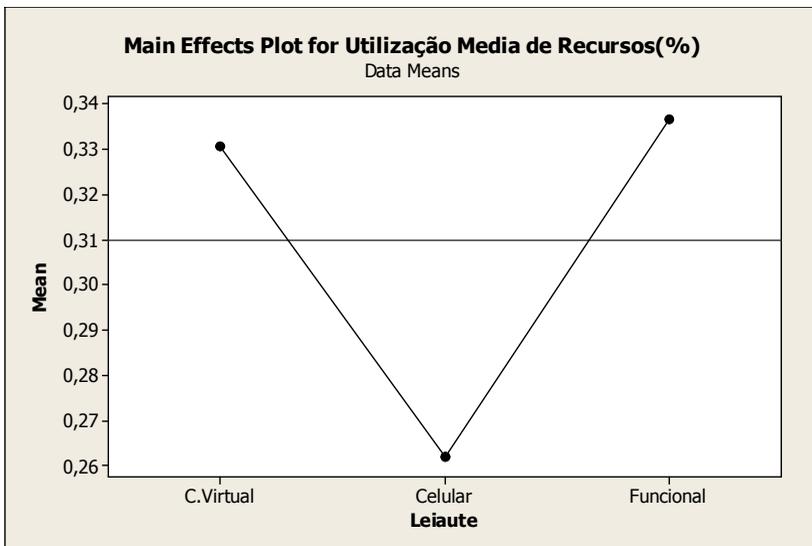


Figura 5.22 – Gráfico de efeito da utilização de recursos no leiaute
Fonte: Autor

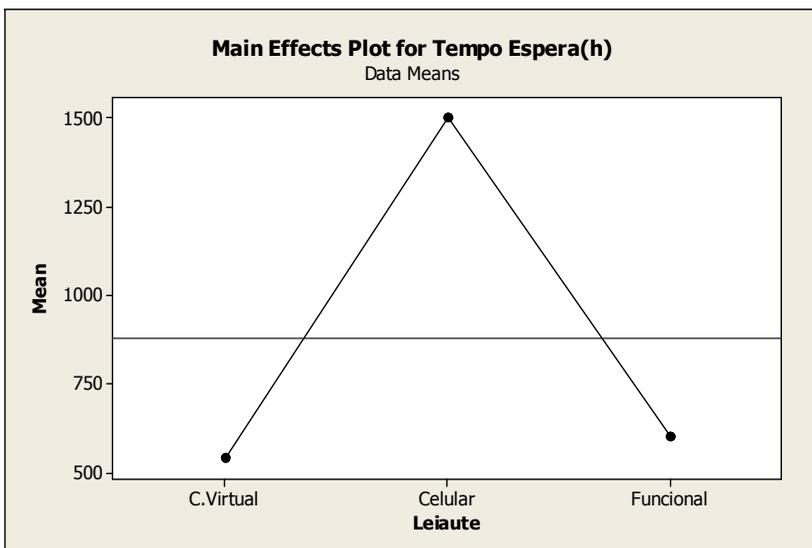


Figura 5.23 – Gráfico de efeito do tempo de espera no leiaute
Fonte: Autor

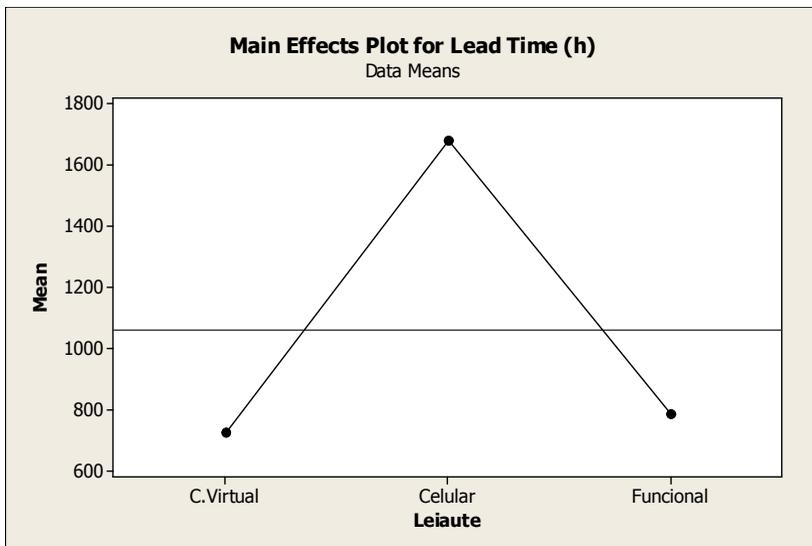


Figura 5.24 – gráfico de efeito do *lead time* no leiaute

Fonte: Autor

6 CONCLUSÕES

Este capítulo tem por objetivo apresentar os resultados da pesquisa, bem como destacar a sua contribuição aos estudos acadêmicos, suas conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

O primeiro objetivo específico da dissertação foi o de criar três modelos de simulação para representar os três sistemas de manufatura: o primeiro com tipo de processo por lotes com configuração funcional, o segundo com configuração celular tradicional e, por último, o leiaute com o sistema de manufatura celular virtual. Para cumprir com este objetivo utilizou-se o software de simulação Arena, na sua versão 9.0. Esses três sistemas foram modelados e encontram-se descritos no capítulo três e quatro.

Um segundo objetivo traçado na introdução do trabalho foi o de modelar um sistema de manufatura que envolvesse diferentes tipos de processo como, por exemplo, fresamento, furação e torneamento.

Além das máquinas, os operadores também foram considerados recursos, bem como os abastecedores, que foram responsáveis por transportar os lotes de peças por todas as etapas dos processos, totalizando assim 21 recursos.

Para a execução dos cálculos e geração dos gráficos utilizou-se o software estatístico Minitab versão 16.

Além disso, o objetivo de ilustrar a lacuna do conhecimento com relação as células virtuais sinaliza o quanto é importante pesquisar esse tema. E as possibilidades ainda não trabalhadas sobre ele nas empresas.

O objetivo principal desta pesquisa, que era o de comparar os três leiautes diferentes, foi atingido. Essas comparações foram descritas no capítulo anterior, que trata dos resultados obtidos via simulação e projeto de experimentos, onde foram apresentados os resultados através das análises de variância, os gráficos de principais fatores e a análise do impacto de cada fator sob as variáveis resposta.

Acredita-se que a presente pesquisa tenha contribuído para ampliar a discussão sobre os tipos de leiaute e, mais ainda, apresentando que o leiaute celular virtual pode ter desempenho semelhante ao funcional, e superior ao celular tradicional. Além disso, a presente pesquisa abrangeu um número maior de fatores de controle e variáveis resposta, quando comparada a trabalhos anteriores como Mello (2005) e Reaes (2008).

Deste trabalho, algumas considerações e conclusões importantes podem ser obtidas. Ter trabalhado com uma gama maior de variáveis

resposta do que os trabalhos anteriores resultou em ter uma análise mais ampla dos três sistemas como um todo. Alguns resultados serão explicitados mais à frente.

Pode-se concluir que para a variável resposta tempo final, na média, o leiaute célula virtual teve um desempenho 23% superior ao leiaute celular convencional, e praticamente igual quando comparado ao leiaute funcional (-1,5%). Porém, observando o intervalo de confiança (Figura 6.2), com um nível de confiança de 95%, estatisticamente não é possível afirmar que os valores médios são diferentes.

Com relação à produtividade, nota-se que o desempenho do leiaute celular virtual foi superior ao celular convencional em cerca de 12%. Já para o leiaute funcional a diferença ficou em apenas 3%, na média. Porém, observando o intervalo de confiança (Figura 6.2), com um nível de confiança de 95%, estatisticamente não é possível afirmar que os valores médios são diferentes.

O leiaute celular virtual obteve um valor de estoque em processo médio inferior aos outros leiautes. O leiaute celular virtual apresentou vantagem de aproximadamente 27% em relação ao leiaute celular tradicional, e para o leiaute funcional vantagem de 10%. Isto mostra que este tipo de leiaute pode se situar entre os leiautes funcional e celular, adquirindo as vantagens de ambos.

Porém, observando o intervalo de confiança (Figura 6.2), com um nível de confiança de 95%, estatisticamente não é possível afirmar que os valores médios são diferentes.

Com relação à utilização dos recursos, mais uma vez o leiaute celular virtual foi superior ao celular tradicional, na média, teve uma utilização dos recursos 20% superior ao celular tradicional. Observando o intervalo de confiança (Figura 6.2), com um nível de confiança de 95%, é possível afirmar que os valores médios entre os leiautes celular virtual e celular tradicional são diferentes.

Com relação à variável resposta tempo de espera, o desempenho do leiaute celular virtual foi novamente superior em relação aos demais, cerca de 10% na média com relação ao funcional e amplamente superior ao leiaute celular (cerca de 50%). Observando o intervalo de confiança (Figura 6.2), com um nível de confiança de 95%, é possível afirmar que os valores médios entre os leiautes celular virtual e celular tradicional são diferentes.

Com relação ao *lead time*, em média o leiaute celular virtual teve resultado favorável, aproximadamente 7% com relação ao funcional e 50% menor com relação ao celular tradicional. Observando o intervalo de

confiança (Figura 6.2), com um nível de confiança de 95%, é possível afirmar que os valores médios entre os leiautes celular virtual e celular tradicional são diferentes.

De uma forma geral, resultados tão diferentes encontrados com relação ao leiaute celular tradicional podem ser entendidos em função da grande variedade de peças. Apesar de todas serem formadas através das 40 *features* pré-estabelecidas, a função randômica do Excel trouxe enorme variabilidade nos lotes, e isto penalizou o leiaute celular tradicional. Além disso, a configuração do leiaute celular o penalizou, ou seja, a questão dos setups de máquinas, o processo de fabricação se dava por lotes e não em fluxo unitário, foram pontos cruciais que refletiram nos resultados do leiaute celular tradicional.

Sabe-se que o leiaute celular tradicional, através da literatura, tem realmente vantagens e resultados muito interessantes e já consagrados em sistemas reais. Contudo, o enfoque da pesquisa está em fomentar o conceito do leiaute celular virtual, ainda pouco conhecido e utilizado nas indústrias a nível global. Para tanto, não pretende-se insinuar com os resultados aqui apresentados que o leiaute celular tradicional não é efetivo no que propõe, mas sim, mostrar que o leiaute celular virtual pode ter ganhos e aplicações em sistemas reais também.

A figura 6.1 ilustra em resumo os valores médios de cada variável resposta, ressaltando os que o celular virtual obteve resultado superior aos demais.

Vale ressaltar também o comportamento do fator tipo de plano de processo. A única variável resposta que sofreu com a ação do fator de controle tipo de plano de processos foi a utilização dos recursos. Para efeito de síntese das conclusões descritas neste capítulo, lista-se a seguir um resumo dos resultados:

- O leiaute celular virtual apresentou alguns resultados superiores em relação aos demais, porém ficando muito próximo ao desempenho do funcional;
- O leiaute celular virtual apresentou melhor desempenho para *lead time*;
- O leiaute celular virtual teve melhor desempenho com relação ao tempo de espera, mostrando que teve menos filas no seu sistema e em consequência menos estoque em processo;

Como sugestões de trabalhos tem-se os seguintes:

- Com relação à utilização de plano de processos com alternativas, sugere-se incluir um nível adicional para este fator, ou ainda duas

penalidades diferentes, para que se possa comprovar os ganhos que estão tão difundidos na literatura.

- Sugere-se abordar a questão da flexibilidade de operadores, que foi utilizada de forma simplificada nesta pesquisa.
- Efetuar um estudo relacionando os resultados encontrados na pesquisa com os custos dos equipamentos, sejam de obsolescência, manutenção, reformas e substituições desses equipamentos.
- Para os fatores de controle a serem considerados, recomenda-se o aumento nos níveis desses fatores para verificar outras condições para os modelos.

	Leiaute Celular Virtual	Leiaute Celular Tradicional	Leiaute Funcional
Tempo Final (h)	4570,729064	5869,548401	4498,149093
Produtividade (pçs/h)	12,72188486	11,15773741	13,12617404
Estoque Médio em Processo (pçs)	3922,737034	5400,114269	4338,772914
Utilização dos Recursos (%)	0,330852432	0,261976609	0,336914882
Tempo Total de Espera (h)	539,8254412	1499,443408	603,0381547
Lead Time (h)	725,2040201	1677,704531	786,7707517

Figura 6.1 – Resultados médios para os três sistemas

Fonte: Autor

	Leiaute Celular Virtual	Leiaute Celular Tradicional	Leiaute Funcional
Tempo Final (h)	$3502,4 \leq \mu \leq 5639,1$	$4500,1 \leq \mu \leq 7239,0$	$3442,8 \leq \mu \leq 5553,5$
Produtividade (pçs/h)	$11,22 \leq \mu \leq 14,22$	$9,74 \leq \mu \leq 12,57$	$11,57 \leq \mu \leq 14,68$
Estoque Médio em Processo (pçs)	$3103,6 \leq \mu \leq 4741,8$	$4290,7 \leq \mu \leq 6509,6$	$3396,0 \leq \mu \leq 5281,6$
Utilização dos Recursos (%)	$0,315 \leq \mu \leq 0,346$	$0,250 \leq \mu \leq 0,273$	$0,320 \leq \mu \leq 0,353$
Tempo Total de Espera (h)	$345,3 \leq \mu \leq 734,3$	$979,8 \leq \mu \leq 2019,1$	$379,9 \leq \mu \leq 826,2$
Lead Time (h)	$509,9 \leq \mu \leq 940,5$	$1136,6 \leq \mu \leq 2218,8$	$543,4 \leq \mu \leq 1030,2$

Figura 6.2 – Intervalos de confiança para os três sistemas

Fonte: Autor

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-AOMAR, R.; AL-OKAILY, A. **A GA-based parameter design for single machine turning process with high-volume production.** Computers and Industrial Engineering, 2006, v.50, p.317-337.

ALTIOK, T. **Performance Analysis of Manufacturing Systems.** New York: Springs Series in Operation Research, 1996. 355p.

ALVARES, A. J. **Uma metodologia para integração CAD/CAM/CAPP voltada para manufatura remota de peças rotacionais baseada na internet.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis -SC, Brasil.

BARTAK, R.; CEPEK, O. **Temporal Networks with alternatives: complexity and model.** Proceedings of the twentieth international Florida artificial intelligent research society conference, FLAIRS, 2008, p. 641-646.

BAYKASOGLU, A.; GOCKEN, M. **Capability-based distributed layout and its simulation based analyses.** Journal of Intelligent Manufacturing 2010, v.21, n.4, p.471-485.

BRAHDWAJ, P.; TIWARI, M. Process Planning through ant colony optimization. In: Tiwari, M.; Harding, J. A. **Evolutionary computing in Advanced manufacturing.** Kharagpur: John Wiley and Sons; 2011. p. 19-35.

BRENNAN, R. W.; FOROUGH, B. **A control framework to support responsive manufacturing.** International Journal of Agile Management Systems, 1999, 1/3, p.159-168.

CAMPOS, V. F. **TQC: Controle da Qualidade Total (no estilo japonês).** 8ª Ed. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1999.

CAMPININI, L. **Gerenciamento de Projetos em uma Empresa de Bens de Capital: Uma Comparação entre os Procedimentos Utilizados e o Método da Corrente Crítica.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia

de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, Brasil. 2008.

CAPEK, R.; SUCHA, P.; HANZALEK, Z. **Production Schedule with alternative process plan.** European Journal of Operational Research, 2012, v.217, n.2, p.300-311.

COLOSIMO, B.M.; SEMERARO Q.; TOLIO, T. **Rule Based System for Non Linear Process Plan Generation,** Studies in Informatics and Control, 2000, v.9, n.2, p.133-143.

CHANG, T. C.; WYSK, R. A.; WANG, H. P. **Computer Aided-Manufacturing.** 3ª Ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2005.

CHIN, S. Y. **Virtual Cells: Evaluation of Different Lot Sizing Splitting Strategies.** International Journal of Manufacturing Research, 2013, v.8, n.1, p.18-42.

DEJA, M.; SIEMIATKOWSKI, M. S. **Generation of Optimal Process Plan Alternatives for Manufacturing Mechanical Components.** Solid State Phenomena, 2010. v.165, p.250-255.

DEJA, M.; SIEMIATKOWSKI, M. S. **Feature-based generation of machining process plans for optimized parts manufacture.** International Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, v.24, n.4, p.831-846.

DEVISE, O.; PIERREVAL, H. **Indicators for measuring performances of morphology and material handling systems in flexible manufacturing systems.** International Journal of Production Economics. 2000, v. 64, p.209-218.

DRIRA, A.; PIERREVAL, H.; HAJRI-GABOUJ, S. **Facility layout problems: A survey.** Annual Reviews in Control, 2007, v. 31, n. 2, p. 255–267.

DROLET, J. R. **Scheduling Virtual Cellular Manufacturing Systems.** 1989. Tese de Doutorado, Purdue University, Indiana – USA.

DROLET, J. R.; ABDULNOUR, G.; RHEAULT, M. **The Cellular Manufacturing Evolution**. Computers & Industrial Engineering, UK, October 1996. v. 31, n. 1/2, p. 139-142.

FERREIRA, J. C. E. **Apostila da Disciplina de Planejamento de Processos (EMC-6333)**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC.1996.

FERREIRA, J. C. E.; WYSK, R. A. **An Investigation of the Influence of Alternative Process Plans on Equipment Control**, Journal of Manufacturing Systems, 2001a, v.19, n.6, p.393-406.

FERREIRA, J. C. E.; WYSK, R. A. **On the Efficiency of Alternatives in Process Plans**, Journal of de Brazilian Society Mechanical Sciences, 2001b, v.23, n.3, p.303-319.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009

FORCELLINI, F. A. (2013). **Tópicos especiais em engenharia de produção: desenvolvimento de serviços**. [Notas de aula]. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

FRAMINAN, J. M. **An adaptative branch and bound approach for transforming *job shops* into *flow shops***. Computers & Industrial Engineering, 2007, v. 52, n. 1, p. 1-10.

FREITAS FILHO, P. **Introdução a Modelagem e Simulação de Sistemas**: com aplicações em Arena. 2ª Ed. Revisada e atualizada. Florianópolis: Visual Books, 2008.

FUNG, R. Y. K.; FENG, L.; JIANG, Z.; WONG, T. N. **A multi-stage Methodology for Virtual Cell Formation Oriented Agile Manufacturing**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. March 2008. V.36, n.7-8, p.798-810.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 5º ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GODINHO FILHO, M. **Paradigmas Estratégicos de Gestão da Manufatura: configuração, relações com o Planejamento e Controle da Produção e estudo exploratório na Indústria de Calçados.**2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP.

GROOVER, M. P. **Automation, Production System and Computer Integrated Manufacturing.** New Jersey: Prentice-Hall, 2007.

GUO, Y. W.; LI, W. D.; MILEHAM, A. R.; OWEN, G. W. **Applications of particle swarm and optimization in integrated process planning and scheduling.** Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, v.25, p.280–288.

HAMEDI, M.; ESMAEILIAN, G. R.; ISMAIL, N.; ARIFFIN, M. K. A. **Capability-based virtual cellular manufacturing systems formation in dual-resource constrained settings using tabu search.** International Journal of Computers & Industrial Engineering, 2012a. v.62, p.953-971.

HAMEDI, M.; ESMAEILIAN, G. R.; ISMAIL, N.; ARIFFIN, M. K. A. **A survey on formation of virtual cellular manufacturing systems (VCMSs) and related issues.** Scientific Research and Essays, 2012b, v.7, n.40, p.3316-3328.

HAMEDI, M.; ISMAIL, N.; ESMAEILIAN, G. R.; ARIFFIN, M. K. A. **Virtual cellular manufacturing system based on resource element approach and analyzing its performance over different basic layouts.** International Journal of Industrial Engineering Computations. 2012c, v.3, p.265-276.

KANNAN, V. R.; GHOSH, S. **Cellular manufacturing using virtual cells.** International Journal of Operations & Production Management, 1996a, v.16, n.5, p.99-112.

KANNAN, V. R.; GHOSH, S. **A virtual cellular manufacturing approach to batch production.** Decision Science, 1996b, v.27, p.519–539.

KENNERLY, M.; NEELY, A. **Measuring Performance in a Changing Business environment**. International Journal of Operations and Production Management, 2003, v.23, n.2, p.213-229.

KHILWANI, N.; ULUTAS, B. H.; ISLIER, A. A.; TIWARI, M. K. **A Methodology to Design Virtual Cellular Manufacturing Systems**. Journal of Intelligent Manufacturing, 2011, v.22, n.4, p.533-544.

LAW, A. M. **How to build valid and credible simulation models**. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference. p. 40-41.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**. 3.ed. McGraw-Hill, 2000.

LI, X.; GAO, L.; SHAO, X. **An active learning genetic algorithm for integrated process planning and scheduling**. Expert systems with Applications, 2012, v.39, p.6683-6691.

LINER, J. K.; MÉIER, D. **O Modelo Toyota: Manual de Aplicação**, São Paulo, Editora Bookman, 2006.

MACHADO, F.; ANDRADE, J. J. O. **Emprego da confiabilidade para o estabelecimento de estratégias de manutenção na indústria metal-mecânica**. XXIII Encontro Nacional da Engenharia de Produção. Salvador – BA, 8 a 11 de Outubro de 2013.

MARIA, A. **Introduction to Modeling and Simulation**. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference, p. 7-13.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. **Administração da Produção**. 2ª ed. São Paulo: Ed. Saraiva. 2005.

MCLEAN, C. R.; BLOOM, H.; HOPP, T. H.; **“The Virtual Manufacturing Cell”**. Proceedings of fourth IFAC/IFIP Conference on Information Control Problems in Manufacturing Technology, Gaithersburg, MD, October 1982.

MELLO, M. H. **Avaliação do Desempenho de Alternativas em Planos de Processo utilizando Simulação e Projeto de Experimentos**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de

Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, Brasil.

MELLO, M. H.; FERREIRA, J. C. E. **Um estudo sobre o uso de alternativas em planos de processo utilizando técnicas de simulação e projeto de experimentos.** In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA - CONEM, 2004, Belém. Anais. Belém: UFPA, 2004.

MICROSOFT EXCEL. Auxílio ao usuário. Disponível em <<http://office.Microsoft.com/pt-br/help/macros-desmistificadas-o-que-sao-e-por-que-usa-las-HA010007210.aspx#BMone>>. Acesso em 17.Nov.2014.

MOKHTAR, A., XU, X. **Machining precedence of 2 1/2 D interacting features in a feature-based data model.** Journal of Intelligent Manufacturing, 2011, v.22, n.2, p.145–161.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiment.** 6 ed. New York: J. Wiley, 2005.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade.** 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

NIEBEL, B. W.; DRAPER, A. B.; WYSK, R. A. **Modern Manufacturing Process Engineering.** McGraw-Hill series in Industrial Engineering and Management Science, 1998.

NONAKA, Y.; ERDŐS, G.; KIS, T.; KOVÁCS, A.; MONOSTORI, L.; NAKANO, T.; VÁNCZA, J. **Generating Alternative process plans for complex parts.** CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2013, n.62, p.453-458.

PEDAGOPU, V. M.; KUMAR, M. **Contemporary Inclination in Capp Systems for Prismatic Parts.** IOSR – Journal of Mechanical and Civil Engineering. International Conference on Advances in Engineering & Technology. 2014, p.5-8.

REAES, P. A. **Comparação de desempenho entre as configurações celular, funcional e celular virtual através de simulação e projeto de**

experimentos. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis -SC, Brasil.

REDDY, B. S. P.; RAO, C. S. P. **Flexible Manufacturing Systems Modelling and Performance Evaluation Using Automod.** International Journal of Simulation Modelling. 2011, v.10, n.2, p.78-90

ROTHER, M.; SHOOK, J. **Aprendendo a enxergar:** mapeando o fluxo de valor para agregar valor e eliminar desperdício. Lean Institute Brasil, 2003.

SANCHEZ, S. M. **Better than a Petaflop:** The Power of Efficient Experimental Design. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, p.73-84.

SECO TOOLS. **Catálogo geral de ferramentas.** Disponível em <<http://www.secotools.com/pt-BR/Global/Services--Support/Online-Catalogue/>>. Acesso em 17.Nov.2014.

SGS TOOLS – KC ferramentas. **Catálogo geral de ferramentas.** Disponível em <<http://www.sultools.com.br/produtos.html>> Acesso em 17.Nov.2014.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção.** 2ª Ed. São Paulo: Atlas, 2002.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção.** 3ª Ed. São Paulo: Atlas, 2009.

SHEN, W.; WANG, L.; HAO, Q. **Agent-based distributed manufacturing process planning and scheduling: a state-of-art survey.** Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions On. 2006, v.36, n.4, p.563-577.

SURESH, N. C.; SLOMP, J. **Performance Comparison of Virtual Cellular Manufacturing with Functional and Cellular Layouts in DRC settings.** International Journal of Production Research. 1 March 2005. v. 43, n.5, p.945-979.

TUBINO, D. F. **Manual de Planejamento e Controle da Produção**. São Paulo: Atlas, 1997.

USHER, John M. **Evaluating the impact of alternative plans on manufacturing performance**, Computers & Industrial Engineering, 2003, v.45, p.585-596.

WANG, Z.; YANG, J.; WANG, G.; ZHANG, G. **Proceedings of the institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**. 2011.

XAMBRE, A. R., VILARINHO, P. M. **Virtual Manufacturing Cell Formation Problem (VMCFP) In a Distributed Layout**. 2007. Paper presented at the ICPR19 - 19th International Conference on Production Research, Valparaiso, Chile.

XU, X.; WANG, L.; NEWMAN, S. T. **Computer-aided process planning – A critical review of recent developments and future trends**. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 2011, v. 24, n.1, p.1–31.

ZATTAR, I. C. **Modelo de Simulação Baseado Agentes para o estudo da Influência de Planos de Processos Alternativos na Programação da Produção em Sistemas de Manufatura com Layout Funcional**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, Brasil.

APÊNDICES

APÊNDICE I – TABELA QUE RELACIONA AS 40 *FEATURES* COM AS FERRAMENTAS E MÁQUINAS

cód	Tempo (min)	1ª alternativa Máquina	2ª Alternativa Máquina	Features	Ferramentas
1		1	2	Furo	DIN6539-12
2		1	2	Furo	DIN6539-13
3		1	2	Furo	DIN6539-15
4		1	2	Furo	DIN6539-18
5		1	2	Furo	DIN6539-20
6		2	3	Rebaixo	FTR-D14
7		2	3	Rebaixo	FTR-D16
8		2	3	Rebaixo	FTR-D18
9		2	3	Rebaixo	FTR-D20
10		2	3	Rebaixo	FTR-D25
11		2	3	Canal	FTR-D12
12		2	3	Canal	FTR-D14
13		2	3	Canal	FTR-D16
14		2	3	Canal	FTR-D18
15		2	3	Canal	FTR-D20
16		3	2	Cavidade	FTR-D16 e FTR-D04
17		3	2	Cavidade	FTR-D20 e FTR-D05
18		3	2	Cavidade	FTR-D14 e FTR-D06
19		3	2	Cavidade	FTR-D16 e FTR-D07
20		3	2	Cavidade	FTR-D25 e FTR-D08
21		4	5	Recartilhar	-
22		4	5	Recartilhar	-
23		4	5	Recartilhar	-
24		4	5	Recartilhar	-
25		4	5	Recartilhar	-

26		5	4	Tornear	CNMG120408-MF1
27		5	4	Tornear	CNMG120408-MF1
28		5	4	Tornear	CNMG120408-MF1
29		5	4	Tornear	CNMG120408-MF1
30		5	4	Tornear	CNMG120408-MF1
31		5	4	Facear	CNMG120408-MF1
32		5	4	Facear	CNMG120408-MF1
33		5	4	Facear	CNMG120408-MF1
34		5	4	Facear	CNMG120408-MF1
35		5	4	Facear	CNMG120408-MF1
36		4	5	Sangrar	LCMF160300-0318-MG
37		4	5	Sangrar	LCMF160300-0318-MG
38		4	5	Sangrar	LCMF160300-0318-MG
39		4	5	Sangrar	LCMF160300-0318-MG
40		4	5	Sangrar	LCMF160300-0318-MG

**APÊNDICE II – TABELA COM O CÁLCULO DOS TEMPOS DE
USINAGEM DE CADA UMA DAS 40 FEATURES.**

cód	Tempo (min)	1ª alternativa Máquina	2ª Alternativa Máquina	Features
1	0,241274315795696	1	2	Furo
2	0,326725635973339	1	2	Furo
3	0,414690230273853	1	2	Furo
4	0,622035345410779	1	2	Furo
5	0,753982236861550	1	2	Furo
6	2,226672687807500	2	3	Rebaixo
7	2,746334630506570	2	3	Rebaixo
8	2,901839530026360	2	3	Rebaixo
9	3,444728786830910	2	3	Rebaixo
10	4,210224072793340	2	3	Rebaixo
11	0,832998052088203	2	3	Canal
12	1,094797439887350	2	3	Canal
13	1,332796883341120	2	3	Canal
14	1,378589181322100	2	3	Canal
15	1,670213815832550	2	3	Canal
16	1,79057525589413	3	2	Cavidade
17	2,06465986328514	3	2	Cavidade
18	2,67440856088424	3	2	Cavidade
19	2,74081246917260	3	2	Cavidade
20	3,36770782646263	3	2	Cavidade
21	0,251327412287183	4	5	Recartilhar
22	0,753982236861550	4	5	Recartilhar
23	1,507964473723100	4	5	Recartilhar
24	2,261946710584650	4	5	Recartilhar
25	3,769911184307750	4	5	Recartilhar
26	0,418879020478639	5	4	Tornear
27	1,316476921504290	5	4	Tornear
28	2,333754542666700	5	4	Tornear
29	4,069110484649640	5	4	Tornear
30	6,821744047794980	5	4	Tornear
31	0,897597901025655	5	4	Facear
32	1,361356816555580	5	4	Facear

33	1,914875522188060	5	4	Facear
34	2,558154017923120	5	4	Facear
35	3,291192303760730	5	4	Facear
36	0,515417544729575	4	5	Sangrar
37	0,652862223324129	4	5	Sangrar
38	0,790306901918682	4	5	Sangrar
39	0,927751580513236	4	5	Sangrar
40	1,256637061435920	4	5	Sangrar

**APÊNDICE III – PARTE DO RASTREAMENTO (*TRACE*)
REFERENTE A UMA SIMULAÇÃO DO MODELO LEIAUTE
CELULAR VIRTUAL**

SIMAN System Trace Beginning at Time: 0.0

Seq# Label Block System Status Change

Time: 0 Entity: 2
 1 112\$ CREATE
 Entity Type set to Entity 1
 Next creation scheduled at time 182.71618
 Batch of 1 Entity 1 entities created
 2 113\$ ASSIGN
 Create 1.NumberOut set to 1.0
 3 0\$ VBA
 VBA event number 1 called
 NumeroPeca set to 1.0
 TipoPlano set to 1.0
 TotalOperacoes set to 9.0
 QuantidadeLote set to 31.0
 TempoProcessamento set to 0.0
 Sequência(1,1) set to 4.0
 Tempo(1,1) set to 0.50265482
 Sequência(2,1) set to 5.0
 Tempo(2,1) set to 0.70371675
 Sequência(1,2) set to 2.0
 Tempo(1,2) set to 2.2266727
 Sequência(2,2) set to 3.0
 Tempo(2,2) set to 3.1173418
 Sequência(1,3) set to 4.0
 Tempo(1,3) set to 2.2619467
 Sequência(2,3) set to 5.0
 Tempo(2,3) set to 3.1667254
 Sequência(1,4) set to 3.0
 Tempo(1,4) set to 2.6744086
 Sequência(2,4) set to 2.0
 Tempo(2,4) set to 3.744172
 Sequência(1,5) set to 2.0
 Tempo(1,5) set to 3.9983907
 Sequência(2,5) set to 3.0
 Tempo(2,5) set to 5.5977469
 Sequência(1,6) set to 1.0
 Tempo(1,6) set to 2.2619467
 Sequência(2,6) set to 2.0
 Tempo(2,6) set to 3.1667254
 Sequência(1,7) set to 4.0
 Tempo(1,7) set to 0.92775158
 Sequência(2,7) set to 5.0
 Tempo(2,7) set to 1.2988522
 Sequência(1,8) set to 3.0

Tempo(1,8) set to 8.2224374
Sequência(2,8) set to 2.0
Tempo(2,8) set to 11.511412
Sequência(1,9) set to 5.0
Tempo(1,9) set to 2.6329538
Sequência(2,9) set to 4.0
Tempo(2,9) set to 3.6861354
TempoProcessamentoTotal set to 25.709162
TempoProcessamentoParcial set to 0.0
TempoProximoLoteMin set to 159.3968
TempoProximoLoteMax set to 239.0952
RESERVAR_MAQ1 set to 0.0
RESERVAR_MAQ2 set to 0.0
RESERVAR_MAQ3 set to 0.0
RESERVAR_MAQ4 set to 0.0
RESERVAR_MAQ5 set to 0.0
RESERVAR_MAQ4 set to 25.0
SEQUÊNCIA_NOVA(1,1) set to 4.0
TEMPO_NOVO(1,1) set to 0.50265482
RESERVAR_MAQ2 set to 25.0
SEQUÊNCIA_NOVA(1,2) set to 2.0
TEMPO_NOVO(1,2) set to 2.2266727
RESERVAR_MAQ4 set to 25.0
SEQUÊNCIA_NOVA(1,3) set to 4.0
TEMPO_NOVO(1,3) set to 2.2619467
RESERVAR_MAQ3 set to 25.0
SEQUÊNCIA_NOVA(1,4) set to 3.0
TEMPO_NOVO(1,4) set to 2.6744086
RESERVAR_MAQ2 set to 25.0
SEQUÊNCIA_NOVA(1,5) set to 2.0
TEMPO_NOVO(1,5) set to 3.9983907
SEQUÊNCIA_NOVA(1,6) set to 1.0
TEMPO_NOVO(1,6) set to 2.2619467
RESERVAR_MAQ1 set to 25.0
RESERVAR_MAQ4 set to 25.0
SEQUÊNCIA_NOVA(1,7) set to 4.0
TEMPO_NOVO(1,7) set to 0.92775158
RESERVAR_MAQ3 set to 25.0
SEQUÊNCIA_NOVA(1,8) set to 3.0
TEMPO_NOVO(1,8) set to 8.2224374
RESERVAR_MAQ5 set to 25.0
SEQUÊNCIA_NOVA(1,9) set to 5.0
TEMPO_NOVO(1,9) set to 2.6329538
Time: 0 Entity: 2
4 43\$ BRANCH
Selecting at most 1 of 2 branches
IF: Entity 2 sent to 116\$
5 116\$ ASSIGN
MAQ_1.NumberOut True set to 1.0
Entity transferred to block 72\$
7 72\$ ASSIGN
FILAMAQ1 set to 1.0
POSFILAI set to 1.0
8 44\$ BRANCH

```
Selecting at most 1 of 2 branches
IF: Entity 2 sent to 118$
9 118$ ASSIGN
MAQ_2.NumberOut True set to 1.0
Entity transferred to block 73$
11 73$ ASSIGN
FILAMAQ2 set to 1.0
POSFILA2 set to 1.0
12 45$ BRANCH
Selecting at most 1 of 2 branches
IF: Entity 2 sent to 120$
13 120$ ASSIGN
MAQ_3.NumberOut True set to 1.0
Entity transferred to block 74$
15 74$ ASSIGN
FILAMAQ3 set to 1.0
POSFILA3 set to 1.0
16 66$ BRANCH
Selecting at most 1 of 2 branches
IF: Entity 2 sent to 122$
17 122$ ASSIGN
MAQ_4.NumberOut True set to 1.0
Entity transferred to block 75$
19 75$ ASSIGN
FILAMAQ4 set to 1.0
POSFILA4 set to 1.0
20 67$ BRANCH
Selecting at most 1 of 2 branches
IF: Entity 2 sent to 124$
21 124$ ASSIGN
MAQ_5.NumberOut True set to 1.0
Entity transferred to block 76$
23 76$ ASSIGN
FILAMAQ5 set to 1.0
POSFILA5 set to 1.0
24 38$ VBA
VBA event number 16 called
MaquinaSelecionada set to 4.0
PROXIMA_ESTACAO set to 4.0
TempoProcessamento set to 0.50265482
Time: 0 Entity: 2
25 37$ STATION
Entity 2 entered station ENTRADA_SISTEMA.Station
26 126$ DELAY
Delayed by 0.0 until time 0.0
27 132$ DELAY
Delayed by 0.0 until time 0.0
28 1$ DELAY
Delayed by 40.779521 until time 40.779521
Time: 40.779521 Entity: 2
29 39$ DELAY
Delayed by 0.0 until time 40.779521
30 150$ QUEUE
Entity 2 sent to next block
```

31 154\$ REQUEST
Tally SAIDA_ENTRADA_SISTEMA.Queue.WaitingTime recorded 0.0
ABASTECEDOR request at station ENTRADA_SISTEMA.Station
ABASTECEDOR(1) to arrive at time 40.779521 at block 154\$
32 142\$ DELAY
Delayed by 0.0 until time 40.779521
33 144\$ TRANSPORT
ABASTECEDOR(1) transport to station DEPT_4
ABASTECEDOR(1) to arrive at time 42.779521 at block 57\$
Time: 42.779521 Entity: 2
134 57\$ STATION
Entity 2 entered station DEPT_4
135 437\$ DELAY
Delayed by 0.0 until time 42.779521
136 59\$ FREE
ABASTECEDOR(1) freed
ABASTECEDOR number available increased to 3
137 56\$ DELAY
Delayed by 3.710403 until time 46.489924
Time: 46.489924 Entity: 2
138 49\$ ASSIGN
FilaTornoC1 set to 15.5823
139 90\$ BRANCH
Selecting at most 1 of 2 branches
IF: Branch not selected
ELSE: Entity 2 sent to 439\$
141 439\$ ASSIGN
Decide 44.NumberOut False set to 1.0
Entity transferred to block 84\$
158 84\$ QUEUE
Entity 2 sent to next block
159 100\$ SEIZE
Tally FILAMAQUINA4.WaitingTime recorded 0.0
Seized 1.0 unit(s) of resource Maquina4C1
Seized 1.0 unit(s) of resource Operador4C1
160 110\$ VBA
VBA event number 28 called
Time: 46.489924 Entity: 2
143 46\$ ASSIGN
TornoC1.NumberIn set to 1.0
TornoC1.WIP set to 1.0
144 441\$ DELAY
Delayed by 30.694522 until time 77.184446
Time: 77.184446 Entity: 2
145 440\$ RELEASE
Maquina4C1 available increased by 1.0 to 2.0
Operador4C1 available increased by 1.0 to 2.0
146 488\$ ASSIGN
TornoC1.NumberOut set to 1.0
TornoC1.WIP set to 0.0
147 50\$ ASSIGN
FilaTornoC1 set to 0.0
148 47\$ ASSIGN
QuantidadeOperacoes set to 1.0

APÊNDICE IV – PLANILHA DE RESULTADOS PARA O LEIAUTE
CELULAR VIRTUAL

Feats por peça	Feats duplic	Qde pçs por lote	Tipo demanda	Tipo plano	Qde lotes sim	Tempo Chegada	Tempo Manut	Tempo final (h)	Prod (pçs/h)	Estoque Medio (pçs)	Utilização Media (%)	tempo Espera (h)	Lead Time (h)
-	-	-	-	-	-	-	-	47,41	31,5	34,98	0,03	8,444	14,97
-	-	-	-	-	-	-	+	47,98	31,1	481,1	0,41	8,45	15,02
-	-	-	-	-	-	+	-	63,09	23,6	19,48	0,03	1,737	8,275
-	-	-	-	-	-	+	+	63,77	23,4	201,4	0,31	1,674	8,215
-	-	-	-	-	+	-	-	144,8	39,7	331,6	0,11	30,89	36,99
-	-	-	-	-	+	-	+	146,7	39,2	1472	0,5	30,81	36,92
-	-	-	-	-	+	+	-	189,3	30,4	72,2	0,11	1,809	7,949
-	-	-	-	-	+	+	+	188,7	30,5	243,3	0,39	1,674	7,776
-	-	-	-	+	-	-	-	56,11	26,6	42,18	0,03	11,04	18,07
-	-	-	-	+	-	-	+	60,66	24,6	551,2	0,43	11,22	18,34
-	-	-	-	+	-	+	-	63,39	23,5	23,11	0,03	2,521	9,842
-	-	-	-	+	-	+	+	66,81	22,3	235,5	0,36	2,388	9,642
-	-	-	-	+	+	-	-	163,5	35,2	402,2	0,13	38,18	44,89
-	-	-	-	+	+	-	+	159,6	36,1	1755	0,55	38,4	45,12
-	-	-	-	+	+	+	-	196,5	29,3	79,09	0,13	1,952	8,72
-	-	-	-	+	+	+	+	193	29,8	263,4	0,43	1,757	8,47
-	-	-	+	-	-	-	-	54,14	27,6	37,18	0,03	9,575	15,87
-	-	-	+	-	-	-	+	54,36	27,5	460,3	0,35	9,788	16,11
-	-	-	+	-	-	+	-	59,7	25,1	19,41	0,03	1,907	8,22
-	-	-	+	-	-	+	+	59,81	25	213,6	0,32	1,852	8,162
-	-	-	+	-	+	-	-	175,4	35,6	444,8	0,12	39,33	45,69
-	-	-	+	-	+	-	+	176	35,5	1677	0,44	39,82	46,18
-	-	-	+	-	+	+	-	206,9	30,2	81,71	0,12	1,936	8,285
-	-	-	+	-	+	+	+	207,8	30,1	262,1	0,38	1,997	8,35
-	-	-	+	+	-	-	-	48,8	30,7	36,32	0,03	8,711	15,5
-	-	-	+	+	-	-	+	50,68	29,5	516	0,45	8,806	15,66
-	-	-	+	+	-	+	-	63,42	23,6	19,38	0,03	1,316	8,21
-	-	-	+	+	-	+	+	66,53	22,5	203,5	0,34	1,203	8,106
-	-	-	+	+	+	-	-	172,9	36,2	479,7	0,13	42,38	49,29
-	-	-	+	+	+	-	+	178,8	35	1842	0,51	42,32	49,25
-	-	-	+	+	+	+	-	204,9	30,5	84,23	0,13	1,577	8,544

-	-	-	+	+	+	+	+	204,1	30,6	272,6	0,43	1,666	8,634
-	-	+	+	-	-	-	-	517,1	35,5	3999	0,28	100,1	155,9
-	-	+	+	-	-	-	+	517,5	35,5	5518	0,4	98,42	154,3
-	-	+	+	-	-	+	-	724,7	25,3	959,2	0,16	12,8	69,42
-	-	+	+	-	-	+	+	722,8	25,4	1773	0,29	12,14	68,26
-	-	+	+	-	+	-	-	1637	42,9	11850	0,33	301	348,3
-	-	+	+	-	+	-	+	1681	41,8	14993	0,43	293,9	341
-	-	+	+	-	+	+	-	2383	29,5	1433	0,25	8,624	55,83
-	-	+	+	-	+	+	+	2354	29,8	1724	0,3	9,033	56,33
-	-	+	+	+	-	-	-	630,2	29,1	4358	0,3	125,7	192,2
-	-	+	+	+	-	-	+	603,9	30,4	6417	0,45	122,4	188,4
-	-	+	+	+	-	+	-	754,1	24,3	980	0,18	5,346	71,58
-	-	+	+	+	-	+	+	753,1	24,4	1844	0,33	6,621	72,84
-	-	+	+	+	+	-	-	1607	43,7	14693	0,41	365,4	421,3
-	-	+	+	+	+	-	+	1668	42,1	19772	0,54	372	427,7
-	-	+	+	+	+	+	-	2415	29,1	1569	0,3	5,915	61,66
-	-	+	+	+	+	+	+	2408	29,2	1816	0,34	5,582	60,96
-	+	+	+	-	-	-	-	1888	9,83	3823	0,29	282	452,9
-	+	+	+	-	-	-	+	1829	10,1	4975	0,38	270	439,4
-	+	+	+	-	-	+	-	2423	7,66	1267	0,23	18,44	189,6
-	+	+	+	-	-	+	+	2428	7,65	1533	0,28	19,41	192,4
-	+	+	+	-	+	-	-	6219	11,5	13766	0,41	1073	1254
-	+	+	+	-	+	-	+	6420	11,2	14697	0,44	1069	1250
-	+	+	+	-	+	+	-	9433	7,59	1564	0,28	29,84	211,2
-	+	+	+	-	+	+	+	9465	7,57	1624	0,29	30,25	211,1
-	+	+	+	+	-	-	-	2025	9,17	4397	0,37	277,6	480,9
-	+	+	+	+	-	-	+	2088	8,89	5066	0,44	267,6	468,5
-	+	+	+	+	-	+	-	2644	7,02	1424	0,27	13,97	215,7
-	+	+	+	+	-	+	+	2629	7,06	1698	0,32	14,25	220
-	+	+	+	+	+	-	-	6356	11,3	18090	0,51	1383	1597
-	+	+	+	+	+	-	+	6216	11,5	19025	0,54	1352	1566
-	+	+	+	+	+	+	-	9383	7,63	1756	0,33	23,33	237,5
-	+	+	+	+	+	+	+	9356	7,65	1869	0,35	23,63	238,3
+	+	+	+	-	-	-	-	7016	2,44	7365	0,42	2300	3109
+	+	+	+	-	-	-	+	6971	2,45	7838	0,44	2304	3112
+	+	+	+	-	-	+	-	10661	1,6	1441	0,28	109,9	922,2
+	+	+	+	-	-	+	+	10811	1,58	1493	0,29	106,6	914,4
+	+	+	+	-	+	-	-	28284	2,56	23516	0,44	8293	9126
+	+	+	+	-	+	-	+	28222	2,57	24084	0,45	8373	9206
+	+	+	+	-	+	+	-	42754	1,69	1656	0,29	133,5	967,8
+	+	+	+	-	+	+	+	42728	1,69	1651	0,29	127,6	962,8

+	+	+	+	+	-	-	-	7816	2,19	7204	0,47	2261	3215
+	+	+	+	+	-	-	+	8318	2,06	7515	0,47	2356	3309
+	+	+	+	+	-	+	-	10864	1,57	1594	0,32	71,46	1029
+	+	+	+	+	-	+	+	10930	1,57	1657	0,33	78,04	1028
+	+	+	+	+	+	-	-	30953	2,34	26530	0,5	9796	10785
+	+	+	+	+	+	-	+	31160	2,32	26949	0,51	9830	10817
+	+	+	+	+	+	+	-	42891	1,69	1830	0,34	93,51	1083
+	+	+	+	+	+	+	+	42707	1,7	1865	0,35	99,34	1090
+	+	+	-	-	-	-	-	6674	2,69	6436	0,43	1688	2480
+	+	+	-	-	-	-	+	6764	2,66	7022	0,46	1702	2494
+	+	+	-	-	-	+	-	10595	1,7	1493	0,27	100,8	891,9
+	+	+	-	-	-	+	+	10524	1,71	1566	0,29	95,35	887,7
+	+	+	-	-	+	-	-	26375	2,69	23164	0,45	7893	8697
+	+	+	-	-	+	-	+	26348	2,69	23554	0,46	7888	8690
+	+	+	-	-	+	+	-	40640	1,75	1605	0,29	114,1	918
+	+	+	-	-	+	+	+	41011	1,73	1614	0,3	111,2	915,3
+	+	+	-	+	-	-	-	8571	2,1	7389	0,44	2358	3303
+	+	+	-	+	-	-	+	8297	2,17	7787	0,47	2266	3201
+	+	+	-	+	-	+	-	10772	1,67	1719	0,32	108,6	1051
+	+	+	-	+	-	+	+	10657	1,69	1829	0,34	116,2	1050
+	+	+	-	+	+	-	-	30125	2,36	25638	0,51	9029	9983
+	+	+	-	+	+	-	+	29192	2,43	25889	0,53	8879	9832
+	+	+	-	+	+	+	-	41022	1,73	1855	0,35	111,9	1071
+	+	+	-	+	+	+	+	40859	1,74	1881	0,35	114	1071
+	+	-	-	-	-	-	-	621,9	2,42	471,1	0,3	195,4	272
+	+	-	-	-	-	-	+	634,2	2,37	653,7	0,43	192,2	268,7
+	+	-	-	-	-	+	-	954,7	1,57	104	0,2	15,41	92,05
+	+	-	-	-	-	+	+	944,7	1,59	150,2	0,29	15,98	92,76
+	+	-	-	-	+	-	-	2405	2,46	1601	0,35	735,2	811,8
+	+	-	-	-	+	-	+	2407	2,46	2007	0,44	736,2	812,7
+	+	-	-	-	+	+	-	3501	1,69	136,5	0,26	15,31	91,62
+	+	-	-	-	+	+	+	3442	1,72	160,5	0,31	15,94	92,43
+	+	-	-	+	-	-	-	740,9	2,03	416,8	0,29	210,2	298,3
+	+	-	-	+	-	-	+	694,9	2,16	678,1	0,47	203	290,1
+	+	-	-	+	-	+	-	1007	1,49	118,2	0,23	14,86	103,1
+	+	-	-	+	-	+	+	990,2	1,52	165,7	0,33	15,66	104,1
+	+	-	-	+	+	-	-	2456	2,41	1811	0,43	778,6	866,8
+	+	-	-	+	+	-	+	2488	2,38	2247	0,54	784,1	872,3
+	+	-	-	+	+	+	-	3553	1,67	155,8	0,31	16,25	104,6
+	+	-	-	+	+	+	+	3532	1,68	177,6	0,36	15,3	103,5
+	-	-	-	-	-	-	-	181,5	7,79	175,3	0,11	53,94	79,71

+	-	-	-	-	-	-	+	180,3	7,84	644,3	0,42	53,8	79,53
+	-	-	-	-	-	+	-	232,7	6,08	75,77	0,11	8,544	34,38
+	-	-	-	-	-	+	+	231,5	6,11	212,2	0,32	8,421	34,11
+	-	-	-	-	+	-	-	602,9	9,53	1436	0,34	189,4	215,3
+	-	-	-	-	+	-	+	599,5	9,58	2047	0,49	186,9	212,8
+	-	-	-	-	+	+	-	804,3	7,14	150,3	0,23	8,159	34,13
+	-	-	-	-	+	+	+	804,9	7,14	243,9	0,37	7,773	33,66
+	-	-	-	+	-	-	-	173,1	8,17	176,4	0,13	52,32	80,22
+	-	-	-	+	-	-	+	176,1	8,03	704,2	0,5	53,56	81,61
+	-	-	-	+	-	+	-	235	6,02	76,35	0,13	6,642	34,64
+	-	-	-	+	-	+	+	226,4	6,25	229	0,37	7,711	35,68
+	-	-	-	+	+	-	-	618	9,3	1681	0,38	223,5	251,7
+	-	-	-	+	+	-	+	682,2	8,42	2447	0,56	224,8	253
+	-	-	-	+	+	+	-	814,3	7,06	156,4	0,25	7,274	35,51
+	-	-	-	+	+	+	+	808,1	7,11	259,4	0,41	7,577	35,78
+	-	-	+	-	-	-	-	150,2	9,37	144,6	0,11	41,3	66,03
+	-	-	+	-	-	-	+	150,8	9,34	634,3	0,48	40,39	65,17
+	-	-	+	-	-	+	-	211,8	6,65	60,57	0,11	2,818	27,57
+	-	-	+	-	-	+	+	211,6	6,65	188,3	0,33	2,944	27,67
+	-	-	+	-	+	-	-	588,1	9,92	1443	0,34	186,8	212,5
+	-	-	+	-	+	-	+	589	9,9	2140	0,51	185,5	211,2
+	-	-	+	-	+	+	-	807	7,23	137	0,22	4,828	30,54
+	-	-	+	-	+	+	+	813,1	7,17	221	0,36	4,498	30,17
+	-	-	+	+	-	-	-	166,1	8,48	161,7	0,12	47,38	73,82
+	-	-	+	+	-	-	+	197,5	7,13	664,8	0,48	47,79	74,25
+	-	-	+	+	-	+	-	214,1	6,58	67,58	0,12	4,431	30,78
+	-	-	+	+	-	+	+	220,2	6,39	204,6	0,35	4,389	30,57
+	-	-	+	+	+	-	-	676,4	8,62	1457	0,34	206,3	233,9
+	-	-	+	+	+	-	+	647,9	9	2252	0,53	205,8	233,3
+	-	-	+	+	+	+	-	809,8	7,2	146,4	0,25	4,923	32,44
+	-	-	+	+	+	+	+	812,5	7,18	236,6	0,4	4,823	32,39
+	-	+	+	-	-	-	-	2020	8,91	6433	0,32	631,5	840,2
+	-	+	+	-	-	-	+	2037	8,84	7737	0,39	637,9	846,7
+	-	+	+	-	-	+	-	2694	6,68	1391	0,24	35,09	243,8
+	-	+	+	-	-	+	+	2744	6,56	1653	0,29	35,65	245
+	-	+	+	-	+	-	-	6436	10,8	23990	0,42	2116	2311
+	-	+	+	-	+	-	+	6386	10,9	25411	0,45	2120	2316
+	-	+	+	-	+	+	-	9501	7,3	1646	0,29	37,99	232,9
+	-	+	+	-	+	+	+	9495	7,3	1746	0,3	39,59	234,9
+	-	+	+	+	-	-	-	1932	9,32	6739	0,41	566,3	808,2
+	-	+	+	+	-	-	+	2076	8,67	8222	0,48	610,7	853,8

+	-	+	+	+	-	+	-	2800	6,43	1480	0,28	18,89	263,4
+	-	+	+	+	-	+	+	2790	6,45	1789	0,33	24,36	269,5
+	-	+	+	+	+	-	-	6898	10	24708	0,49	2216	2444
+	-	+	+	+	+	-	+	6542	10,6	27587	0,53	2267	2495
+	-	+	+	+	+	+	-	9605	7,22	1841	0,34	28,78	258,5
+	-	+	+	+	+	+	+	9478	7,31	1908	0,36	28,38	258
+	+	-	+	-	-	-	-	686,2	2,16	314,2	0,21	195,4	273,5
+	+	-	+	-	-	-	+	681,1	2,17	606,6	0,4	194	271,7
+	+	-	+	-	-	+	-	973,7	1,52	101,9	0,21	11,68	89,76
+	+	-	+	-	-	+	+	957,7	1,55	142	0,29	11,72	89,9
+	+	-	+	-	+	-	-	2367	2,52	1819	0,4	742,2	819,5
+	+	-	+	-	+	-	+	2390	2,49	2095	0,46	745,6	823
+	+	-	+	-	+	+	-	3479	1,71	137,1	0,27	12,9	90,29
+	+	-	+	-	+	+	+	957,7	1,55	142	0,29	11,72	89,9
+	+	-	+	+	-	-	-	740,8	2	376,2	0,27	202,1	291,3
+	+	-	+	+	-	-	+	798,3	1,85	635,5	0,45	208	297,1
+	+	-	+	+	-	+	-	1004	1,47	110,7	0,23	9,709	98,95
+	+	-	+	+	-	+	+	981,6	1,51	150,8	0,33	8,075	97,65
+	+	-	+	+	+	-	-	2604	2,29	1844	0,42	814,9	903,7
+	+	-	+	+	+	-	+	2567	2,32	2254	0,52	806,9	895,5
+	+	-	+	+	+	+	-	3495	1,7	149,3	0,31	9,927	99,43
+	+	-	+	+	+	+	+	3465	1,72	173,1	0,36	10,43	99,6
+	-	+	-	-	-	-	-	1883	9,03	5523	0,3	542,6	729,5
+	-	+	-	-	-	-	+	1850	9,19	6837	0,37	543,5	730,7
+	-	+	-	-	-	+	-	2479	6,86	1375	0,24	42,31	230,4
+	-	+	-	-	-	+	+	2489	6,83	1602	0,28	41,8	227,8
+	-	+	-	-	+	-	-	6327	11	21253	0,4	1906	2094
+	-	+	-	-	+	-	+	6321	11,1	23131	0,43	1900	2087
+	-	+	-	-	+	+	-	9247	7,55	1652	0,29	35,41	223,1
+	-	+	-	-	+	+	+	9204	7,59	1726	0,3	36,15	223,9
+	-	+	-	+	-	-	-	2032	8,37	5817	0,36	534,7	750,8
+	-	+	-	+	-	-	+	1817	9,35	7563	0,48	523	741
+	-	+	-	+	-	+	-	2492	6,82	1455	0,28	22,19	241,3
+	-	+	-	+	-	+	+	2539	6,69	1690	0,33	23,82	242,4
+	-	+	-	+	+	-	-	6665	10,5	23485	0,48	2029	2249
+	-	+	-	+	+	-	+	6555	10,7	25703	0,52	2037	2257
+	-	+	-	+	+	+	-	9235	7,56	1819	0,33	30,56	251,3
+	-	+	-	+	+	+	+	9398	7,43	1899	0,35	29,74	249,7
-	+	+	-	-	-	-	-	1728	10	3347	0,32	223	404,7
-	+	+	-	-	-	-	+	1703	10,1	4368	0,43	221,4	406,2
-	+	+	-	-	-	+	-	2556	6,76	1205	0,24	14,37	197

-	+	+	-	-	-	+	+	2549	6,78	1406	0,28	15,41	199,8
-	+	+	-	-	+	-	-	6226	11,2	13167	0,42	1071	1262
-	+	+	-	-	+	-	+	6200	11,3	14546	0,46	1084	1274
-	+	+	-	-	+	+	-	9714	7,2	1539	0,29	28,21	219
-	+	+	-	-	+	+	+	9601	7,28	1604	0,3	27,37	217,9
-	+	+	-	+	-	-	-	1902	9,08	4413	0,38	321,3	536,8
-	+	+	-	+	-	-	+	1830	9,44	5394	0,47	313,6	529,7
-	+	+	-	+	-	+	-	2649	6,52	1420	0,28	25,02	246,1
-	+	+	-	+	-	+	+	2649	6,52	1672	0,32	24,83	248,3
-	+	+	-	+	+	-	-	6698	10,4	17969	0,5	1495	1721
-	+	+	-	+	+	-	+	6482	10,8	19589	0,55	1485	1712
-	+	+	-	+	+	+	-	9777	7,15	1807	0,34	31,18	260,2
-	+	+	-	+	+	+	+	9824	7,12	1863	0,35	29,84	257,6
-	+	-	+	-	-	-	-	136,5	10,4	92,2	0,09	25,28	41,68
-	+	-	+	-	-	-	+	135,2	10,5	485,6	0,46	25,64	42,08
-	+	-	+	-	-	+	-	195,4	7,27	38,46	0,09	1,077	17,31
-	+	-	+	-	-	+	+	195,3	7,27	134,1	0,3	1,3	17,71
-	+	-	+	-	+	-	-	500,3	11,9	907,2	0,32	99,33	116,9
-	+	-	+	-	+	-	+	499,4	12	1377	0,49	97,39	114,8
-	+	-	+	-	+	+	-	782,6	7,63	94,4	0,19	2,878	20,32
-	+	-	+	-	+	+	+	780,5	7,65	156,9	0,32	2,672	20,02
-	+	-	+	+	-	-	-	170,4	8,33	109,8	0,1	31,09	49,65
-	+	-	+	+	-	-	+	170,2	8,34	462,5	0,42	31,45	49,96
-	+	-	+	+	-	+	-	199,9	7,1	49,56	0,1	3,438	22,34
-	+	-	+	+	-	+	+	203	7	162,2	0,34	3,448	22,46
-	+	-	+	+	+	-	-	582,1	10,3	1088	0,35	125,7	145,7
-	+	-	+	+	+	-	+	554,8	10,8	1594	0,52	124,2	144,3
-	+	-	+	+	+	+	-	785,3	7,6	105,1	0,22	2,657	22,75
-	+	-	+	+	+	+	+	798,2	7,48	176,9	0,36	2,775	22,9
-	+	-	-	-	-	-	-	194,8	8,01	131,3	0,12	32,77	54,08
-	+	-	-	-	-	-	+	194,4	8,03	435,7	0,39	32,35	53,68
-	+	-	-	-	-	+	-	278,3	5,61	61,4	0,12	3,94	25,21
-	+	-	-	-	-	+	+	275,9	5,65	149,7	0,28	3,982	25,21
-	+	-	-	-	+	-	-	597,2	10,1	916,7	0,3	112,8	131,2
-	+	-	-	-	+	-	+	597,9	10,1	1329	0,43	113,2	131,7
-	+	-	-	-	+	+	-	843	7,13	102,3	0,2	3,732	22,26
-	+	-	-	-	+	+	+	831,6	7,23	164,3	0,31	3,884	22,3
-	+	-	-	+	-	-	-	239,4	6,52	151,3	0,13	37,96	62,31
-	+	-	-	+	-	-	+	201,2	7,75	507,3	0,44	38,29	62,35
-	+	-	-	+	-	+	-	293	5,32	65,07	0,13	2,532	26,73
-	+	-	-	+	-	+	+	291,6	5,35	149,1	0,31	2,284	26,71

-	+	-	-	+	+	-	-	615,1	9,77	1138	0,36	137,3	158,6
-	+	-	-	+	+	-	+	642	9,36	1689	0,53	137,2	158,5
-	+	-	-	+	+	+	-	840,4	7,15	107,1	0,22	3,064	24,39
-	+	-	-	+	+	+	+	841,4	7,14	177,1	0,36	2,938	24,22
-	-	+	-	-	-	-	-	433,8	42,4	2853	0,26	55,65	102,4
-	-	+	-	-	-	-	+	427,3	43,1	4769	0,42	59,34	106,3
-	-	+	-	-	-	+	-	623,8	29,5	1166	0,2	8,034	54,91
-	-	+	-	-	-	+	+	641,4	28,7	1655	0,28	8,255	55,48
-	-	+	-	-	+	-	-	1387	50,1	9768	0,32	239,8	283,6
-	-	+	-	-	+	-	+	1390	50	14755	0,46	249,5	293,5
-	-	+	-	-	+	+	-	2147	32,4	1276	0,24	5,767	49,71
-	-	+	-	-	+	+	+	2153	32,3	1628	0,3	5,52	49,27
-	-	+	-	+	-	-	-	463	39,8	3632	0,3	77,91	132,7
-	-	+	-	+	-	-	+	457,9	40,2	5607	0,47	73,94	128,6
-	-	+	-	+	-	+	-	684,7	26,9	1200	0,21	7,827	61,67
-	-	+	-	+	-	+	+	638,1	28,9	1902	0,32	9,061	64,13
-	-	+	-	+	+	-	-	1528	45,5	14450	0,41	335,3	387,1
-	-	+	-	+	+	-	+	1531	45,4	18932	0,53	336,3	388
-	-	+	-	+	+	+	-	2213	31,4	1505	0,28	7,024	58,9
-	-	+	-	+	+	+	+	2189	31,8	1961	0,36	7,609	59,47

APÊNDICE V – VALORES CALCULADOS PARA AS ANÁLISES DE VARIÂNCIA (ANOVA) MEDIANTE O SOFTWARE MINITAB.

Analysis of Variance for Tempo Final (h), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Leiaute	2	304890503	304890503	152445252	3,35	0,036
Features por Peça	1	7833343329	7833343329	7833343329	172,18	0,000
Features Duplicadas	1	7180916044	7180916044	7180916044	157,84	0,000
Qtide Peças por Lote	1	13456064030	13456064030	13456064030	295,77	0,000
Tipo Demanda	1	8411825	8411825	8411825	0,18	0,667
Tipo de Plano Processo	1	1507183	1507183	1507183	0,03	0,856
Qtide Lotes Simulados	1	6273131802	6273131802	6273131802	137,89	0,000
Tempo Chegada entre Lotes	1	333445373	333445373	333445373	7,33	0,007
Manutenção	1	90232	90232	90232	0,00	0,964
Error	757	34439713660	34439713660	45494998		
Total	767	69831513979				

Analysis of Variance for Produtividade (pçs/h), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Leiaute	2	553,4	553,4	276,7	9,39	0,000
Features por Peça	1	45516,7	45516,7	45516,7	1545,23	0,000
Features Duplicadas	1	40976,6	40976,6	40976,6	1391,10	0,000
Qtide Peças por Lote	1	320,1	320,1	320,1	10,87	0,001
Tipo Demanda	1	81,0	81,0	81,0	2,75	0,098
Tipo de Plano Processo	1	11,8	11,8	11,8	0,40	0,526
Qtide Lotes Simulados	1	776,9	776,9	776,9	26,38	0,000
Tempo Chegada entre Lotes	1	2307,6	2307,6	2307,6	78,34	0,000
Manutenção	1	0,0	0,0	0,0	0,00	0,969
Error	757	22298,3	22298,3	29,5		
Total	767	112842,5				

Analysis of Variance for Estoque Médio (pçs), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Leiaute	2	297145585	297145585	148572792	5,29	0,005
Features por Peça	1	1234779358	1234779358	1234779358	43,97	0,000
Features Duplicadas	1	1474393	1474393	1474393	0,05	0,819
Qtide Peças por Lote	1	11714008837	11714008837	11714008837	417,13	0,000
Tipo Demanda	1	84515047	84515047	84515047	3,01	0,083
Tipo de Plano Processo	1	57802341	57802341	57802341	2,06	0,152
Qtide Lotes Simulados	1	4411453576	4411453576	4411453576	157,09	0,000
Tempo Chegada entre Lotes	1	8136702312	8136702312	8136702312	289,74	0,000
Manutenção	1	74206730	74206730	74206730	2,64	0,104
Error	757	21258588606	21258588606	28082680		
Total	767	47270676784				

Analysis of Variance for Utilização Média de Recursos(%), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Leiaute	2	0,88716	0,88716	0,44358	90,86	0,000
Features por Peça	1	0,16781	0,16781	0,16781	34,37	0,000
Features Duplicadas	1	0,15649	0,15649	0,15649	32,05	0,000
Qtide Peças por Lote	1	0,61804	0,61804	0,61804	126,59	0,000
Tipo Demanda	1	0,00409	0,00409	0,00409	0,84	0,360
Tipo de Plano Processo	1	0,36423	0,36423	0,36423	74,60	0,000
Qtide Lotes Simulados	1	0,83882	0,83882	0,83882	171,81	0,000
Tempo Chegada entre Lotes	1	1,60611	1,60611	1,60611	328,97	0,000
Manutenção	1	2,89767	2,89767	2,89767	593,52	0,000
Error	757	3,69581	3,69581	0,00488		
Total	767	11,23622				

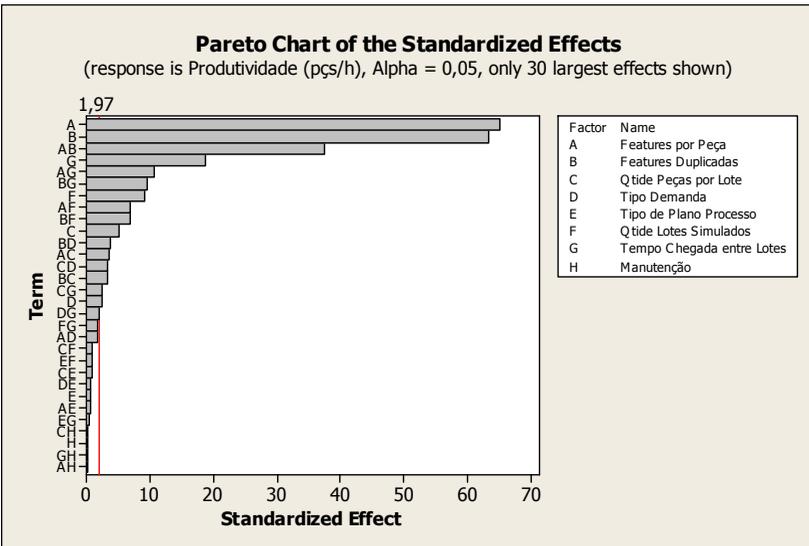
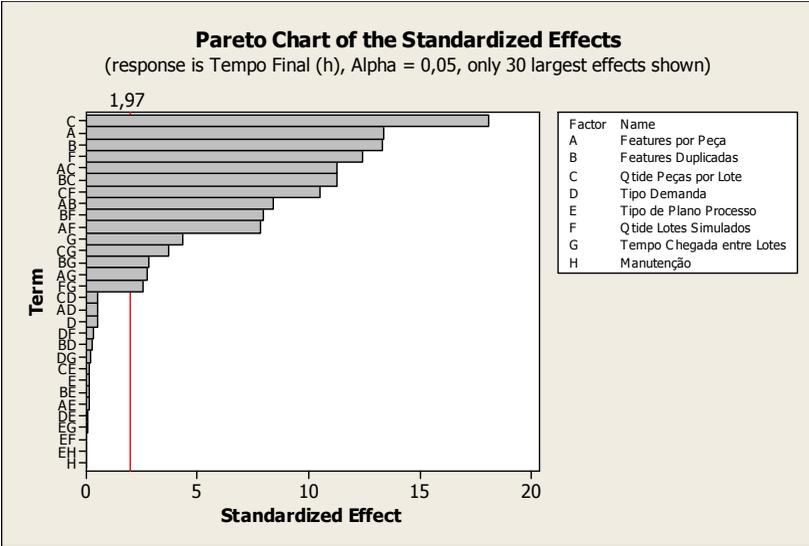
Analysis of Variance for Tempo Espera(h), using Adjusted SS for Tests

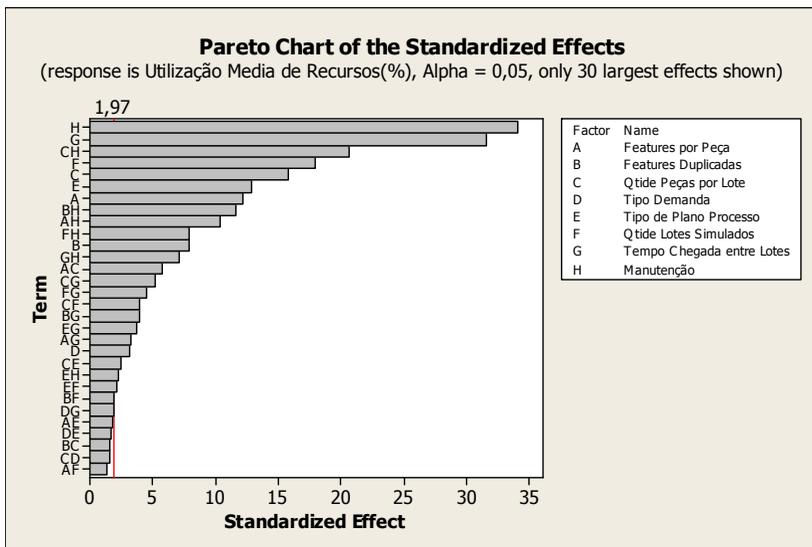
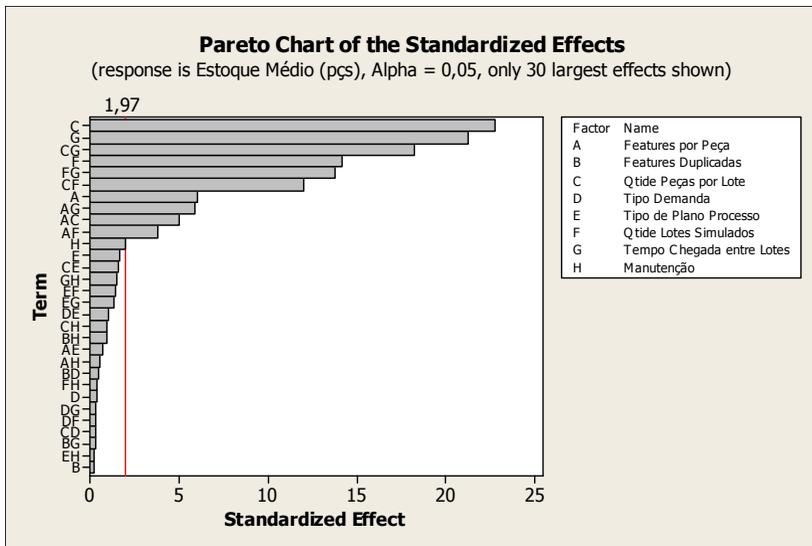
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Leiaute	2	147490549	147490549	73745274	12,66	0,000
Features por Peça	1	398386590	398386590	398386590	68,37	0,000
Features Duplicadas	1	208942698	208942698	208942698	35,86	0,000
Qtide Peças por Lote	1	408525577	408525577	408525577	70,11	0,000
Tipo Demanda	1	30331689	30331689	30331689	5,21	0,023
Tipo de Plano Processo	1	1189894	1189894	1189894	0,20	0,651
Qtide Lotes Simulados	1	209895694	209895694	209895694	36,02	0,000
Tempo Chegada entre Lotes	1	350989185	350989185	350989185	60,23	0,000
Manutenção	1	619	619	619	0,00	0,992
Error	757	4411194810	4411194810	5827206		
Total	767	6166947305				

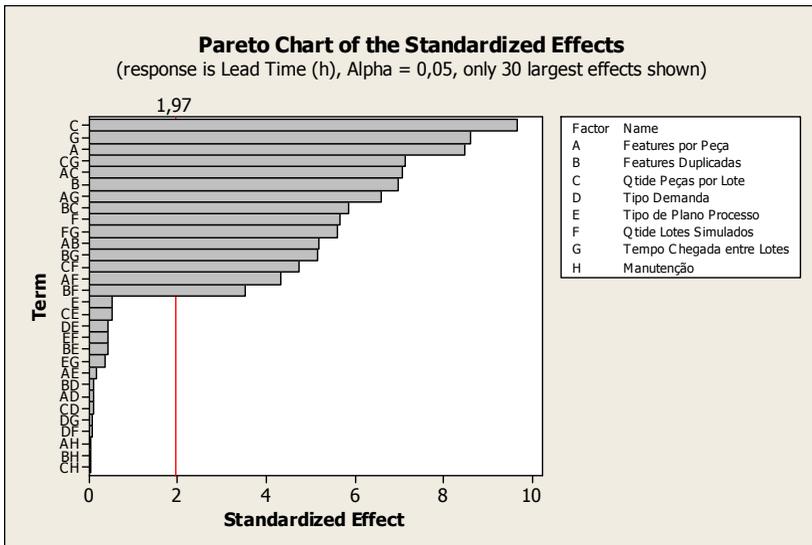
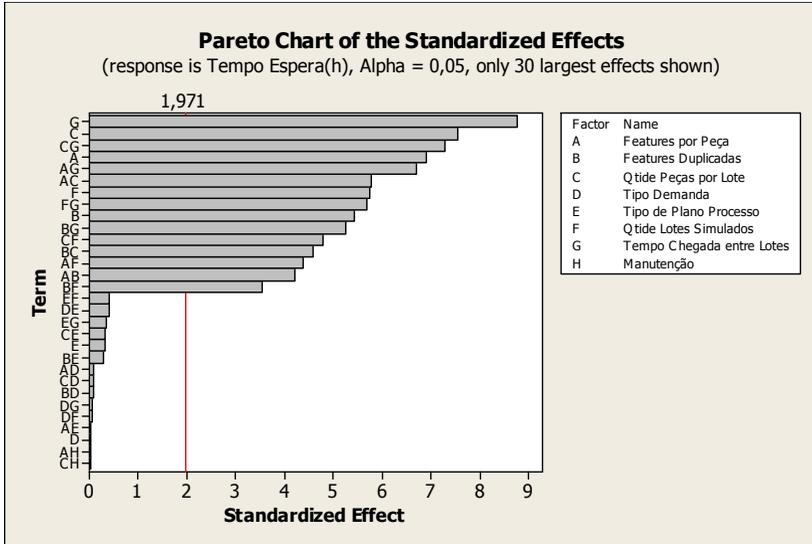
Analysis of Variance for Lead Time (h), using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Leiaute	2	145477179	145477179	72738589	11,78	0,000
Features por Peça	1	535095194	535095194	535095194	86,64	0,000
Features Duplicadas	1	306562580	306562580	306562580	49,64	0,000
Qtide Peças por Lote	1	594529333	594529333	594529333	96,27	0,000
Tipo Demanda	1	30442026	30442026	30442026	4,93	0,027
Tipo de Plano Processo	1	2176227	2176227	2176227	0,35	0,553
Qtide Lotes Simulados	1	211496332	211496332	211496332	34,25	0,000
Tempo Chegada entre Lotes	1	351401542	351401542	351401542	56,90	0,000
Manutenção	1	765	765	765	0,00	0,991
Error	757	4675086345	4675086345	6175808		
Total	767	6852267523				

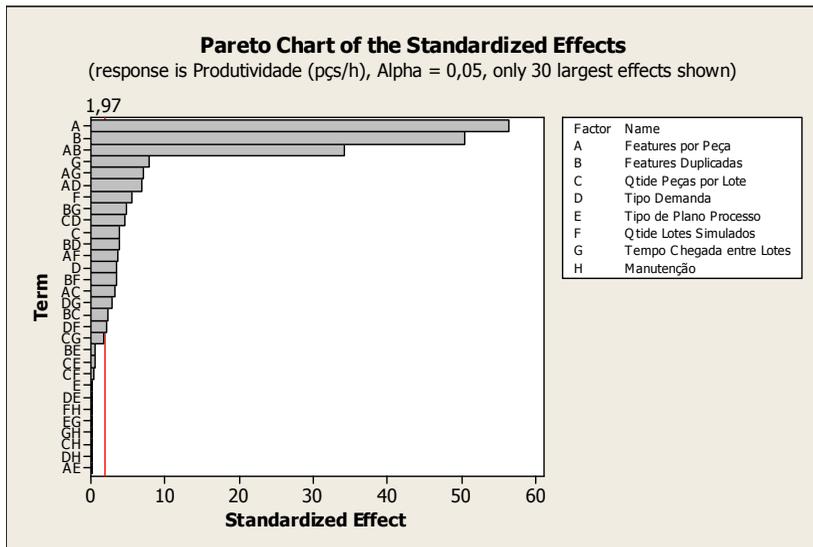
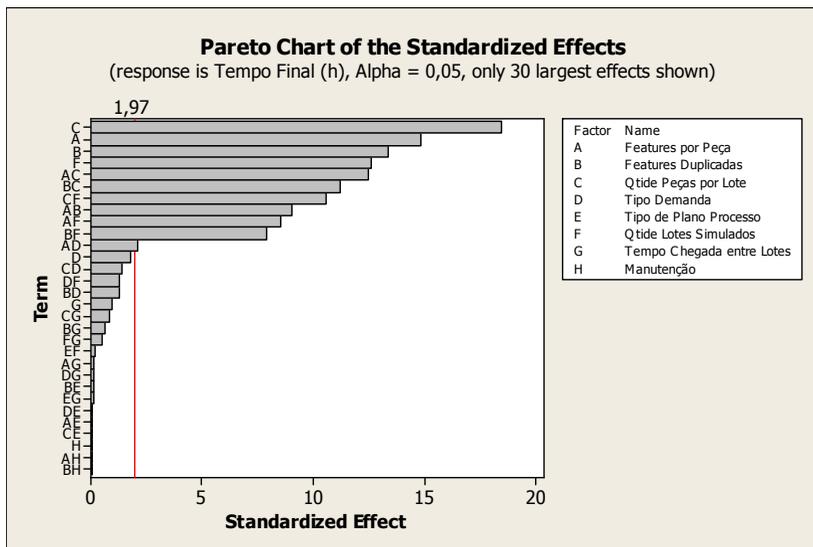
APÊNDICE VI – GRÁFICO DE PARETO – LEIAUTE FUNCIONAL

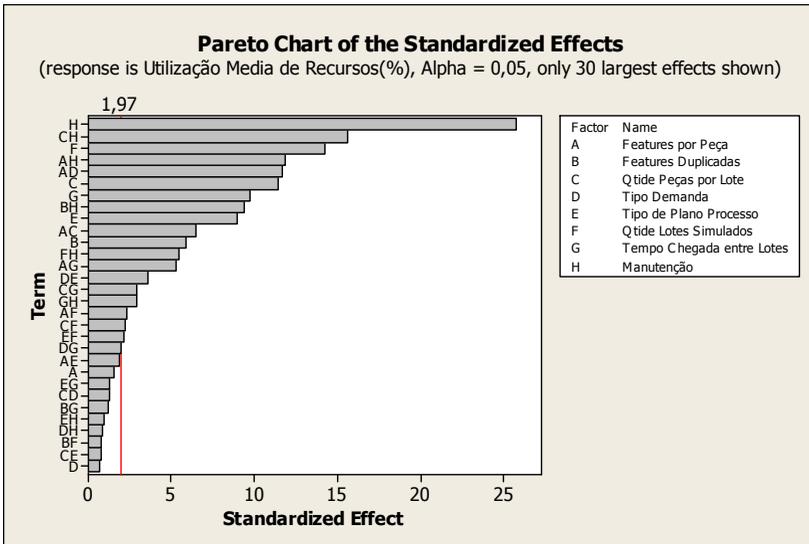
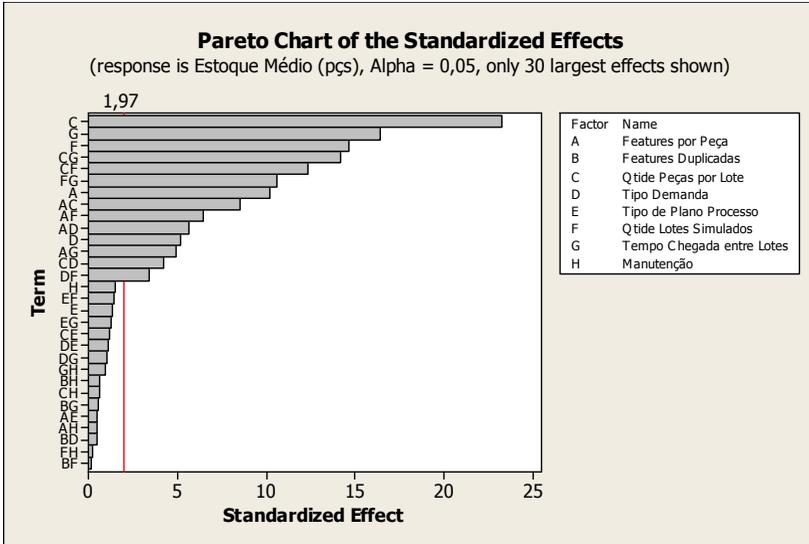


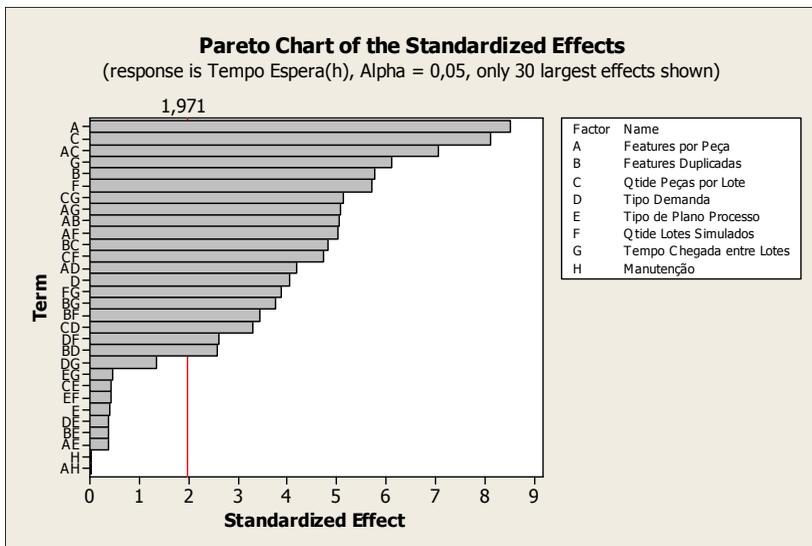




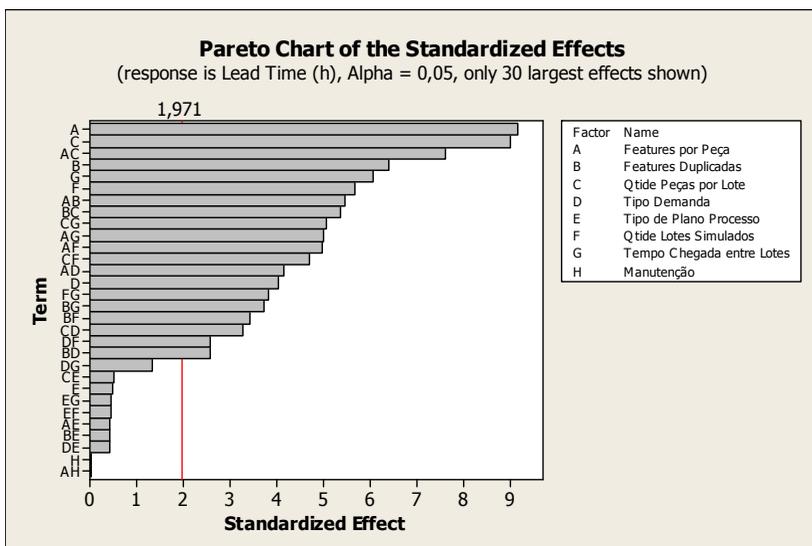
APÊNDICE VII – GRÁFICO DE PARETO – LEIAUTE CELULAR







Factor	Name
A	Features por Peça
B	Features Duplicadas
C	Qtide Peças por Lote
D	Tipo Demanda
E	Tipo de Plano Processo
F	Qtide Lotes Simulados
G	Tempo Chegada entre Lotes
H	Manutenção



Factor	Name
A	Features por Peça
B	Features Duplicadas
C	Qtide Peças por Lote
D	Tipo Demanda
E	Tipo de Plano Processo
F	Qtide Lotes Simulados
G	Tempo Chegada entre Lotes
H	Manutenção

APÊNDICE VIII – GRÁFICO DE PARETO – LEIAUTE CELULAR VIRTUAL

