

CENTRO UNIVERISITÁRIO DA FEI  
ALEXANDRE COELHO

**PROPOSIÇÃO DE ALTERAÇÕES NA LINHA DE PRODUÇÃO DE TRELIÇAS  
PARA O AUMENTO DO VOLUME DE PRODUÇÃO**

São Bernardo do Campo  
2015

ALEXANDRE COELHO

**PROPOSIÇÃO DE ALTERAÇÕES NA LINHA DE PRODUÇÃO DE TRELIÇAS  
PARA O AUMENTO DO VOLUME DE PRODUÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro Universitário da FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica com ênfase em Produção.  
Orientado pelo Prof. Dr. João Chang Junior.

São Bernardo do Campo

2015

Coelho, Alexandre.

Proposição de alterações na linha de produção de treliças para o aumento do volume de produção / Alexandre Coelho. São Bernardo do Campo, 2015.

118 f.

Dissertação - Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Dr. João Chang Junior.

1. Small wood industry. 2. Modeling. 3. Simulation. I. Chang Junior, João, orient. II. Título.



# APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA EXAMINADORA

Mestrado

Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mecânica

PGM-10

**Aluno:** Alexandre Coelho

**Matrícula:** 212305-7

**Título do Trabalho:** Proposição de alterações na linha de produção de treliças para o aumento do volume de produção

**Área de Concentração:** Produção

**Orientador:** Prof. Dr. João Chang Júnior

**Data da realização da defesa:** 21/10/2015

**ORIGINAL ASSINADA**

**Avaliação da Banca Examinadora:**

---

---

---

---

---

São Bernardo do Campo,     /     /     .

## MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

**Prof. Dr. João Chang Júnior**

Ass.: \_\_\_\_\_

**Prof. Dr. Alexandre Augusto Massote**

Ass.: \_\_\_\_\_

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sara Gurfinkel Marques de Godoy**

Ass.: \_\_\_\_\_

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO

REPROVADO

### VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

**APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE  
FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA  
EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

À Deus e aos meus pais Francisco e Iolanda  
pelo constante apoio, compreensão e incentivo  
em buscar sempre novos conhecimentos.

## AGRADECIMENTOS

À Deus pela saúde, força de vontade e disposição.

Aos meus pais Iolanda Maria Fernandes Coelho e Francisco Coelho Neto pelo incentivo e força.

Aos meus irmãos Eduardo Coelho e Mariane Coelho pelo companheirismo.

À minha namorada Gabriela Franco de Carvalho pelo companheirismo, incentivo e força.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Chang Junior pela dedicação, paciência, apoio e orientação.

Aos professores da FEI que de alguma forma contribuíram para o andamento desse trabalho e principalmente aos professores: Prof. Dr. Wilson de Castro Hilsdorf, Prof. Dr. João Chang Junior, Prof. Dr. Alexandre Augusto Massote, Prof. Dr. Fabrizio Leonardi, Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury e Prof. Dr. Fábio Lima pelos ensinamentos nas aulas ministradas.

A todos os funcionários da FEI e principalmente ao Ricardo, Márcia, Adriana que sempre fizeram o máximo para esclarecer as questões administrativas desse curso.

A equipe da biblioteca e principalmente a bibliotecária Cintia Fernandes que sempre fizeram o máximo para esclarecer todas as dúvidas.

À empresa Solução Madeiras, em especial ao diretor Raimundo Santana pelo incentivo e por disponibilizar a empresa para a realização desse estudo.

## RESUMO

A indústria madeireira no Brasil, na sua grande maioria, apresenta estrutura produtiva precária, com baixo volume de produção e sua sobrevivência depende muito da busca de melhoria em seus processos de fabricação. Muitas decisões são tomadas com base em modelos pouco precisos, muito qualitativos, pouco quantitativos e sem considerar a dinâmica dos sistemas. A simulação computacional permite realizar alterações no sistema e verificar os resultados sem mudar o sistema real. O objetivo desse trabalho é o de propor mudanças no processo produtivo de treliças de madeira, com vista a obter um aumento da produção. Foram levantadas todas as informações referentes ao processo produtivo, principalmente a quantidade de recursos, equipamentos, *layout* e tempos de produção de cada etapa. Os tempos foram tratados estatisticamente para verificar a distribuição de probabilidade que melhor se ajustou aos dados com o auxílio do programa Stat::Fit. Foi criado um modelo de avaliação do sistema no *software* ProModel e, após a validação desse modelo, foram simulados três experimentos com nove cenários para avaliar o percentual de utilização dos equipamentos e recursos, bem como o volume de produção da empresa. Os resultados mostraram que a linha atual de produção possui uma utilização muito baixa dos equipamentos e dos recursos. De todas as alternativas avaliadas, o aumento da produção de treliças foi obtido considerando-se três equipamentos denominados de destopadeira e nove operadores, ou seja, a produção passaria de 20 para 54 treliças (um aumento de 170%). Realizou-se uma análise de viabilidade econômica do investimento relativo à melhor proposta pelos métodos do *payback period*, do valor presente líquido – VPL e da taxa interna de retorno – TIR. Os três métodos são complementares e todos os resultados mostraram que é viável a realização do investimento em dois equipamentos destopadeira (uma já existe na produção) e contratação de mais três operadores. A simulação computacional mostrou ser uma ótima ferramenta para auxiliar as tomadas de decisões na linha de produção de indústrias madeireiras de pequeno porte.

**Palavras-chave:** indústria madeireira de pequeno porte. Modelagem e simulação.

## ABSTRACT

The timber industry in Brazil, for the most part, had poor production structure, with low production volume and your survival depends largely on the search for improvement in its manufacturing processes. Many decisions are made based inaccurate models, very qualitative, little quantitative and without considering the dynamics of the system. The computer simulation allows perform change system and check the results without changing the actual system. The aim of this study is to propose changes in the production process of wood trusses in order to obtain an increase in production. They were raised all information relating to the production process, especially the amount of resources, equipment, and layout of each stage production times. Times were statistically treated to verify the probability distribution that best fit the data with the help of the Stat::Fit program. A system assessment model was created in ProModel software was created and, after validation of this model, three experiments were simulated with nine scenarios to assess the percentage of use of equipment and resources, as well as the production volume of the company. The results showed that the current production line has a very low utilization of equipment and resources. In all alternatives evaluated, increasing the truss production was obtained considering three devices called wood cutter nine operators, namely, production increased from 20 to 54 trusses (an increase of 170 percent). It was conducted an economic feasibility analysis of investment on the best methods proposed by the payback period, net present value - NPV and internal rate of return - IRR. The three methods are complementary and all results showed that the realization is feasible the realization of the investment in two wood cutter equipments (one already exists in production) and hiring three more operators. The computer simulation showed up a great tool to assist decision making in the small wood industries production line

**Keywords:** small wood industry. Modeling and simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação da pesquisa científica na engenharia de produção.....	16
Figura 2 - Representação esquemática do sistema <i>flow shop</i> .....	26
Figura 3 - Representação esquemática do sistema de manufatura <i>job shop</i> .....	28
Figura 4 - Relação entre as classes de problemas de programação da produção em máquinas.....	31
Figura 5 - Transformação da realidade em modelo.....	32
Figura 6 - Relação entre as diferentes fases de um projeto e seu custo.....	35
Figura 7 - Relação entre os custos com e sem aplicação da simulação.....	35
Figura 8 - Relação entre previsibilidade e complexidade do sistema.....	38
Figura 9 - Relação entre sistema, modelo e simulador.....	41
Figura 10 - Etapas para o estudo de modelagem e simulação.....	47
Figura 11 - Distribuição normal.....	54
Figura 12 - Distribuição exponencial.....	56
Figura 13 - Distribuição gama.....	57
Figura 14 - Distribuição de Weibull.....	59
Figura 15 - Modelo de treliça de madeira.....	64
Figura 16 - <i>Layout</i> da fábrica de treliças.....	65
Figura 17 - Mapofluxograma da linha de manufatura de treliças de madeira.....	66
Figura 18 - Montagem do modelo - Definição das informações gerais.....	71
Figura 19 - Montagem do modelo - Definição dos locais.....	72
Figura 20 - Montagem do modelo - Definição das entidades.....	73
Figura 21 - Montagem do modelo - Definição da rede de caminhos.....	74
Figura 22 - Montagem do modelo - Definição dos recursos.....	75
Figura 23 - Montagem do modelo - Definição dos processos.....	76
Figura 24 - Montagem do modelo - Definição das chegadas.....	77
Figura 25 - Modelo de simulação do setor em estudo.....	78
Figura 26 - Taxa de utilização dos recursos.....	82
Figura 27 - Gráfico da produtividade <i>versus</i> número de operadores.....	84
Figura 28 - Grau de utilização dos operadores <i>versus</i> a quantidade de operadores.....	86
Figura 29 - Valor presente líquido - VPL do investimento a diferentes taxas.....	91
Figura 30 - Gráfico da distribuição ajustada para a máquina destopadeira.....	107
Figura 31 - Gráfico da distribuição ajustada para a máquina prensa c.....	108
Figura 32 - Gráfico da distribuição ajustada para a máquina serra circular pneumática.....	109
Figura 33 - Gráfico da distribuição ajustada para a máquina serra circular.....	110
Figura 34 - Gráfico da distribuição ajustada para a máquina prensa <i>roller</i> .....	111

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação resumida de sistema, modelo e simulação .....	42
Quadro 2 - Evolução dos sistemas de simulação.....	49
Quadro 3 - Símbolos utilizados para representar um fluxo de processo .....	53
Quadro 4 - Mapa do processo da linha de manufatura do banzo superior e inferior.....	69
Quadro 5 - Mapa do processo da linha de manufatura dos montantes .....	69
Quadro 6 - Mapa do processo da linha de manufatura das diagonais .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Amostras iniciais dos tempos de produção .....	68
Tabela 2 - Distribuições de probabilidade .....	68
Tabela 3 - Comparação entre o volume de produção planejado / real e simulado .....	79
Tabela 4 – Utilização dos equipamentos no sistema atual .....	81
Tabela 5 - Percentual de utilização dos recursos .....	81
Tabela 6 - Número de operadores <i>versus</i> volume de produção.....	83
Tabela 7 – Percentual de utilização dos equipamentos com a variação de operadores.....	84
Tabela 8 - Percentual de utilização dos operadores com a variação no número de operadores .....	85
Tabela 9 - Turnos de trabalho <i>versus</i> volume de produção.....	86
Tabela 10 – Percentual de utilização dos equipamentos com variação de turnos de trabalho .	87
Tabela 11 - Percentual de utilização dos operadores com variação de turnos de trabalho.....	87
Tabela 12 – Volume de produção com o aumento do equipamento destopadeira .....	88
Tabela 13 – Percentual de utilização dos equipamentos com o acréscimo de destopadeiras...	89
Tabela 14 - Percentual de utilização dos operadores com o acréscimo de destopadeiras .....	89
Tabela 15 - Amostras dos tempos de produção .....	105

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	O PROBLEMA .....	13
1.2	OBJETIVO DO TRABALHO .....	14
1.3	DELIMITAÇÕES .....	14
1.4	RELEVÂNCIA DO TRABALHO .....	15
1.5	CLASSIFICAÇÃO E METODOLOGIA DA PESQUISA .....	15
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
2.1	SISTEMA DE APOIO À DECISÃO – SAD.....	19
2.2	SISTEMAS DE PRODUÇÃO .....	20
<b>2.2.1</b>	<b>Tipos de sistema de produção .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Sequenciamento da produção .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Regras de sequenciamento da produção .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Problemas de programação da produção (<i>Scheduling</i>).....</b>	<b>25</b>
2.3	SIMULAÇÃO.....	31
<b>2.3.1</b>	<b>Justificativa econômica da simulação.....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Definição de sistema .....</b>	<b>36</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Definição de modelo .....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Simulação Computacional.....</b>	<b>40</b>
2.4	ALGUMAS METODOLOGIAS PARA OS ESTUDOS DE SIMULAÇÃO .....	42
2.5	SOFTWARES DE SIMULAÇÃO.....	48
2.6	SOFTWARE DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL UTILIZADO.....	50
2.7	MAPEAMENTO DO PROCESSO .....	52
2.8	FUNÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA .....	53
<b>2.8.1</b>	<b>Distribuição normal .....</b>	<b>54</b>
<b>2.8.2</b>	<b>Distribuição exponencial.....</b>	<b>55</b>
<b>2.8.3</b>	<b>Distribuição gama.....</b>	<b>57</b>
<b>2.8.4</b>	<b>Distribuição de Weibull .....</b>	<b>58</b>

2.8.5	<b>Distribuição binomial.....</b>	59
2.8.6	<b>Distribuição de Poisson .....</b>	60
2.8.7	<b>Testes de hipóteses .....</b>	60
3	<b>DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....</b>	<b>63</b>
3.1	PROCESSO DE FABRICAÇÃO .....	64
3.2	ATIVIDADES E MAPOFLUXOGRAMA .....	66
3.3	TEMPOS E MAPA DO PROCESSO.....	66
3.4	CONSTRUÇÃO DO MODELO .....	71
3.5	VALIDAÇÃO DO MODELO .....	78
3.6	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	80
3.6.1	<b>Primeiro experimento: volume de produção e indicadores do sistema atual .....</b>	<b>80</b>
3.6.2	<b>Segundo experimento: mudança no número de operadores .....</b>	<b>83</b>
3.6.3	<b>Terceiro experimento: variação no número de turnos de trabalho.....</b>	<b>86</b>
3.6.4	<b>Quarto experimento: variação no número de equipamentos .....</b>	<b>88</b>
3.6.5	<b>Análise da viabilidade econômico-financeira e implementação.....</b>	<b>90</b>
4	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>93</b>
	REFERÊNCIAS .....	96
	APÊNDICE A – Tempos de processamento coletados.....	104
	APÊNDICE B – Curvas de distribuição teórica de probabilidades .....	106
	APÊNDICE C - Programação do modelo no ProModel.....	112

## 1 INTRODUÇÃO

Uma empresa começa a se tornar vulnerável quando aparecem outras similares com a mesma função, ou com produtos de melhor qualidade e com preço de mercado menor. Com isso as empresas precisam melhorar constantemente a linha de produção, ampliá-las, conhecer os custos de produção em cada setor da empresa, conhecer seus gargalos e capacidades produtivas, melhorar a qualidade, rapidez, confiabilidade e flexibilidade que diretamente afetam os custos. Com a redução de custos dos insumos e processos de determinado produto, consegue-se manter ou aumentar os lucros e tornar o produto competitivo em um mercado cada vez mais acirrado (FERREIRA; MOURA; RIBEIRO, 2001).

Na medida em que o mercado mundial se torna dinâmico e turbulento, muitas empresas não estão preparadas para essa exigência e sofrerão consequências graves, porém para se manter no mercado as empresas precisam responder mais rapidamente à dinâmica do mercado e ter respostas rápidas às necessidades dos clientes. É essencial a criação de novas estratégias de produção, para poder explorar o máximo da capacidade produtiva. (LIM; ZHANG, 2003).

Para Saad (2003), o processo de fabricação apresenta diversas variáveis que mudam de acordo com a dinâmica do mercado, algumas dessas variáveis são: demanda estocástica, pequena variação no lote de produção, mudanças frequentes e imprevisíveis no *mix* de produtos, alta variação no processo e tempos de *set-up*, sequência de produção variável, elevado volume de informações e forte concorrência. Para se manter competitivo e próspero o sistema de produção deve ser gerenciado de forma a responder rapidamente as variações e com um baixo custo.

Quando se analisa novos investimentos e recursos, surgem muitas questões como qual é o melhor layout da linha estudada, como ter a maior produtividade, flexibilidade e qualidade da linha sempre com menor quantidade de recursos possíveis. Normalmente as respostas para essas questões são dadas por colaboradores ou grupos com experiência, muitas vezes são decisões qualitativas e pouco quantitativas, ou que consideram modelos matemáticos estáticos, que não aborda a dinâmica do sistema, levado muitas vezes ao erro (INGALLS, 2002).

A indústria madeireira de uma forma geral, principalmente a que processa madeira serrada, utiliza constantemente esse modelo equivocado para projetar suas linhas de produção ou novos projetos e quando instalada constata a má utilização dos recursos, gerando

desperdícios, baixa produtividade e elevados custos, que muitas vezes levam à falência da organização (HEINRICH, 2010).

A modelagem de um sistema é baseada na avaliação de um indivíduo sobre o sistema real, um modelo dificilmente abordará todos os detalhes do sistema, pois por mais inteligente, experiente e com a maior quantidade de artefatos tecnológicos utilizados, sempre faltarão detalhes para representar a realidade completamente. Assim para Pidd (1998), um modelo é uma representação externa e explícita de parte da realidade vista pela pessoa que deseja usar aquele modelo para entender, mudar, gerenciar e controlar parte daquela realidade.

Normalmente, para estudo de simulação são usados modelos matemáticos que são desenvolvidos com a ajuda de softwares de simulação. Os modelos matemáticos classificam-se entre determinísticos (quando as variáveis internas e externas possuem valores fixos) ou estocásticos (pelo menos uma variável interna ou externa é probabilística); estáticos (o tempo não é levado em consideração) ou dinâmicos (a interação da variação do tempo com as variáveis é levada em consideração). Tipicamente modelos de simulação são estocásticos e dinâmicos (MARIA, 1997).

A simulação é uma ferramenta que serve para avaliar o desempenho de um sistema, existente ou proposto, sob diversas configurações ou cenários e por longos períodos de tempo. É usada na análise de um sistema antes da sua implantação para verificar se o sistema proposto ou alterado realmente atende às solicitações desejadas (MARIA, 1997). Com a simulação consegue-se verificar antecipadamente se aquele sistema ou *layout* proposto realmente produzirá os resultados esperados, com a vantagem do custo baixo comparado com o custo na desmobilização após a montagem do que foi proposto. Para Brighenti (2006) um benefício da simulação computacional é a visualização gráfica do projeto ou sistema estudado na forma estática e dinâmica, que contribui muito para análise, com dados e gráficos mais precisos.

## 1.1 O PROBLEMA

O estudo foi desenvolvido em uma empresa do setor madeireiro que produz treliças em madeira para montagem de estruturas de madeira; a linha de produção em estudo possui máquinas projetadas pela própria empresa, que foram dimensionadas apenas com a experiência do diretor e do encarregado, sem o auxílio de nenhum estudo detalhado e profissional especializado. Havia a suspeita de que essa linha de produção estava sendo mal

aproveitada; além disso, pretendia-se montar uma nova linha e esperava-se identificar as condições que possibilitassem a máxima produção.

Para realizar mudanças, principalmente as que exigem altos investimentos, é necessário realizar profundas análises técnicas e econômicas antes de colocar em prática o novo projeto, para isso é imprescindível à utilização de análises confiáveis.

A empresa objeto de estudo utiliza dados pouco precisos, as decisões são tomadas baseadas na experiência de alguns colaboradores, em estudos estáticos, impossibilitando a visualização dinâmica do sistema, além, da utilização de poucas variáveis e quase nenhuma interação entre elas. Outro detalhe é a falta de recursos computacionais que torna complexa e demorada à análise de cenários.

Diante da realidade da empresa, que gera resultados superficiais e pouco precisos, algumas decisões são tomadas erroneamente, como por exemplo, a disposição das máquinas na linha de produção, contratação e criação de turnos de trabalho, decisões de investimento em novos equipamentos até a não construção de uma nova linha de manufatura.

A simulação computacional será aplicada na linha de produção a fim de entender o processo e obter resultados que ajudarão a diretoria nas tomadas de decisões, importantes para o futuro da empresa.

## 1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo desse trabalho é a proposição de mudanças no processo produtivo de uma indústria madeireira de pequeno porte, que levem a um aumento no volume de produção.

## 1.3 DELIMITAÇÕES

O foco desta pesquisa é em uma empresa do setor madeireiro, mais especificamente na manufatura de produtos madeireiros para a construção civil. Não foram levadas em consideração mudanças no *layout* da fábrica e todos os experimentos foram realizados sobre o *layout* atual.

A diretoria da empresa estabeleceu que caso fosse necessário um acréscimo de algum equipamento o número máximo seria de dois, enquanto que para o número de operadores seria de seis, ou seja, o dobro do contingente atual na linha de produção.

## 1.4 RELEVÂNCIA DO TRABALHO

A modelagem e a simulação são utilizadas em várias áreas do conhecimento para permitir que os usuários e gestores possam representar e examinar as operações de um processo utilizando diferentes condições e cenários possíveis, alterando procedimentos ou condições sem perturbar o sistema operacional real (ABUKHOUSA, et al. 2014).

As indústrias de processamento de madeira, de um modo geral, tomam suas decisões operacionais baseadas muitas vezes na experiência de alguns colaboradores, o que na maioria das vezes não resulta na melhor alternativa.

Por isso, nesse trabalho foi utilizada a simulação computacional para estudar diferentes cenários, além de mostrar algumas vantagens desta técnica para o apoio à tomada de decisões na indústria madeireira de pequeno porte.

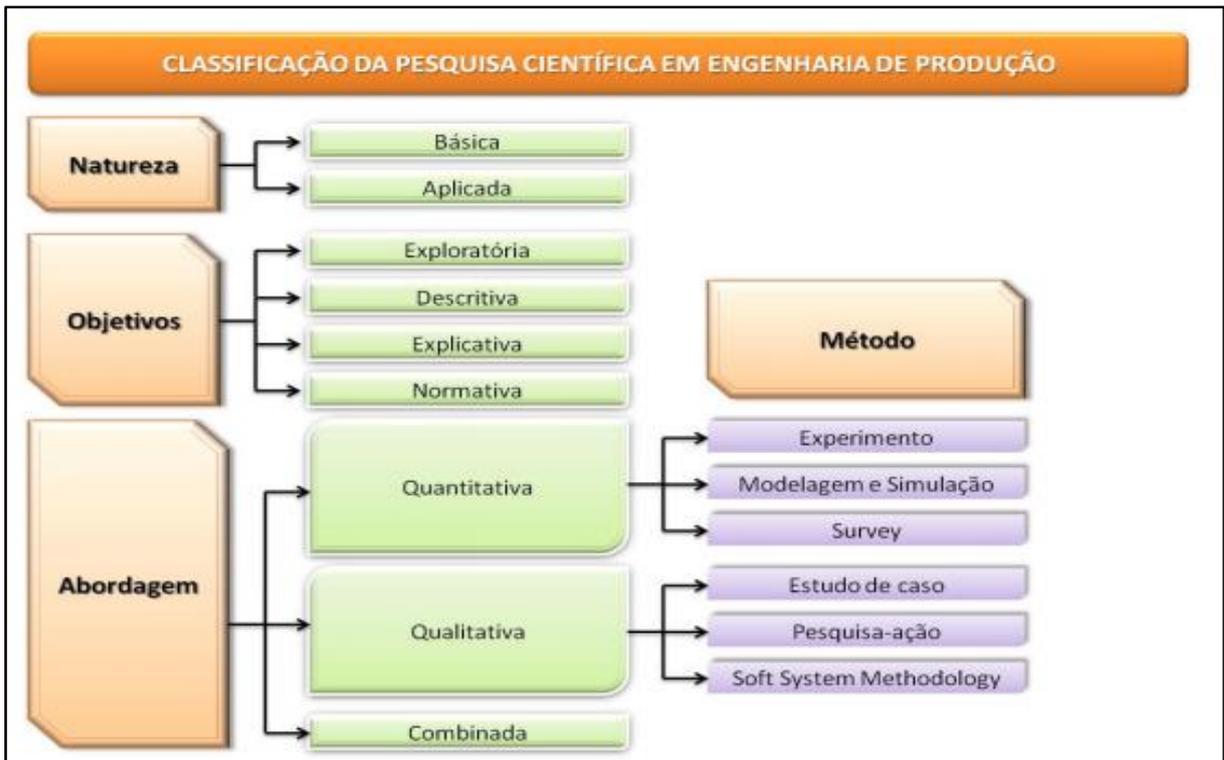
Para Harrel et al. (2002), a simulação é uma tecnologia fundamental na análise e melhoria das operações empresariais e aliada às técnicas de otimização tem possibilitado expressivos ganhos de produtividade da manufatura, os principais critérios avaliados são: o tempo, avaliação de sistemas de movimentação de materiais, *layout* da planta, planejamento de capacidade produtiva, programação de *job shop*, as novas tecnologias, equipamentos ou processos.

## 1.5 CLASSIFICAÇÃO E METODOLOGIA DA PESQUISA

Para Silva e Menezes (2005), a definição de pesquisa trata-se de um conjunto de ações, propostas para encontrar a solução de um problema e que utiliza como base procedimentos racionais e sistêmicos. Uma pesquisa é realizada quando se tem um problema e não se tem informações ou não estão claras para solucioná-lo.

Segundo Turrioni e Mello (2012), a classificação das pesquisas científicas pode ser um assunto bastante controverso, pelo fato dela se basear no enfoque dado pelo autor. Porém uma forma de classificar as pesquisas científica na engenharia de produção são mostradas na figura 1.

Figura 1 - Classificação da pesquisa científica na engenharia de produção



Fonte: Turrioni e Mello, 2012, p 80

Para Miguel (2007), os tipos principais de pesquisas mais comuns em engenharia de produção e gestão de operações são: desenvolvimento teórico-conceitual, estudo de caso, levantamentos tipo *surveys*, modelagem e simulação, pesquisa-ação, revisão da literatura e pesquisas experimentais.

Segundo Miguel et al. (2010), os métodos de pesquisa mais apropriados para conduzir uma pesquisa quantitativa, na área de engenharia de produção, são: pesquisa de avaliação (*survey*), modelagem e simulação, experimento e quase-experimento.

Portanto de acordo com as classificações propostas, podemos enquadrar esta pesquisa da seguinte forma:

Esta é uma pesquisa aplicada, pois, objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos (TURRIONI; MELLO, 2012).

Do ponto de vista dos objetivos do trabalho é caracterizada como uma pesquisa exploratória que visa proporcionar maior familiaridade com o problema de forma a torná-lo explícito ou possibilitar a construção de hipóteses. Envolve levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado e análise de exemplos que estimule a compreensão (TURRIONI; MELLO, 2012).

É classificada como uma pesquisa quantitativa, pois, informações do sistema serão traduzidas em números e modelos, que serão simulados gerando resultados também numéricos (TURRIONI; MELLO, 2012).

Os métodos de pesquisa utilizados foram a modelagem e a simulação, empregados quando se deseja implementar modificações em um sistema real, por meio de um modelo, para verificar como este sistema responderá a essas mudanças. Pode haver ou não o uso de computadores para manipular as variáveis do modelo (MIGUEL et al., 2010).

Para Bertrand e Fransoo (2002), a simulação deve ser usada quando se deseja prever o efeito de mudanças no sistema ou avaliar seu desempenho ou comportamento. Além disso, segundo os autores, a simulação é utilizada na resolução de problemas reais, durante o gerenciamento de operações, que envolve processos de projetos, planejamento, controle e operação, seja em indústrias de manufatura ou serviços.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em quatro capítulos principais, cujos conteúdos estão descritos a seguir:

- a) o primeiro capítulo apresenta a introdução, o problema abordado, os objetivos da pesquisa, delimitações, a relevância do trabalho e a classificação e metodologia da pesquisa;
- b) no segundo capítulo foi realizada a revisão bibliográfica, onde são abordados os seguintes temas: sistemas de apoio à tomada de decisão, sistemas de produção e regra de sequenciamento, definições de simulação, as definições de sistema e modelo, as definições de simulação computacional, metodologias para estudos de simulação, os principais softwares de simulação bem como o que foi utilizado nesta pesquisa, aplicação do mapeamento de processos e um apanhado sobre as principais distribuições de probabilidade e testes de hipóteses para análise dos dados levantados e utilizados no modelo de simulação;
- c) no terceiro capítulo são apresentados o desenvolvimento da pesquisa e a análise dos resultados. São mostrados os dados da empresa onde o estudo foi realizado, produto foco da pesquisa, mapofluxograma do processo, estatística e distribuição dos dados levantados, montagem dos modelos e simulações computacionais, experimentos com os devidos cenários e por fim análises de viabilidade econômico-financeira.

- d) a conclusão do trabalho é apresentada no quarto capítulo por intermédio de um resumo dos resultados e considerações finais da pesquisa. Por fim, neste capítulo são descritas as sugestões para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi realizada em três partes, sendo que a primeira apresenta uma revisão acerca de sistemas de apoio à tomada de decisão, gargalos na linha de produção e sequenciamento da produção.

A segunda parte trata-se de uma revisão de simulação computacional, bem como os conceitos de sistema e modelo, as principais metodologias propostas para a elaboração de estudos de simulação, os principais *softwares* de simulação, e uma revisão sobre o mapeamento de processos.

Na terceira parte foi realizada uma revisão das principais funções de densidade de probabilidade.

### 2.1 SISTEMA DE APOIO À DECISÃO – SAD

Segundo Sprage e Watson (1991 apud HEINRICH, 2010), um SAD é um sistema de informação baseado em computadores destinados a auxiliar na solução de problemas decisórios relativamente mal estruturados, onde o problema global não é bem compreendido e não é possível fazer uma avaliação analítica completa, e onde é necessário interagir julgamento, experiência e discernimento.

Para Gravina (2002), os SAD são sistemas computacionais que quando alimentados com dados, de forma correta, fornecem elementos que facilitam para o usuário a tomada de decisão. O uso dos SAD tem aumentado com a crescente popularização e o desenvolvimento da informática, que estão mais potentes e evoluídas. Tem sido usada para auxiliar a tomada de decisão em diversas áreas, como por exemplo: no marketing, nas finanças, nos sistemas administrativos e produtivos, entre outros.

Segundo Oliveira (2007), durante todas as fases de um processo, o SAD pode auxiliar as tomadas de decisão, contribuindo na resolução de problemas complexos, que podem ser de ordem estruturada ou não estruturada. Os SAD são projetados para utilizar as percepções e avaliações da pessoa tomadora de decisão, em um processo de modelagem específica que resulta em uma decisão específica. Além disso, possibilitam não somente respostas rápidas e interativas, como também a utilização de dados de diferentes bases, que possam integrar um sistema.

Segundo Gomes, Gomes e Almeida (2009 apud HEINRICH, 2010), os SAD constituem um campo multidisciplinar que envolve teoria da decisão, arquiteturas lógicas,

metodologias de concepção, interação entre homem e máquina e inteligência artificial. Além disso, são muito utilizados para resolver problemas através da combinação entre modelos e técnicas analíticas.

Existem quatro características básicas para um SAD, que são: apoiar o tomador de decisão em sistemas menos ou mais estruturados, combinar os modelos ou técnicas analíticas com os instrumentos de acesso aos dados, ser amigável para os usuários não especialistas em informática, integrar características ambientais e cognitivas do tomador de decisão, enfatizando a flexibilidade e adaptabilidade frente à evolução do problema (SPRAGUE; WATSON, 1991 apud HEINRICH, 2010).

O sistema de apoio à decisão (SAD) proporciona os seguintes benefícios: possibilitam simulações rápidas dos modelos, na maioria dos casos os custos com a modelagem são menores, comparado com analisar alternativas no sistema real, a modelagem permite a avaliação de riscos relacionada a ações específicas, com o modelo criado é possível analisar um grande número de alternativas e soluções possíveis e os modelos podem aprimorar e reforçar o aprendizado através da visão clara de sistemas complexos (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2009 apud HEINRICH, 2010).

## 2.2 SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Um sistema de produção pode ser definido como um conjunto de atividades inter-relacionadas que estão envolvidas na produção de bens, no caso de indústrias ou de serviços (MOREIRA, 2000).

Segundo Tubino (2009), quando o produto fabricado é algo tangível, diz-se que o sistema de produção é uma manufatura de bens, por outro lado quando o produto gerado é intangível, diz-se que o sistema de produção é um prestador de serviços.

Segundo Gaither e Frazier (2002), os sistemas de produção são compostos basicamente por quatro subsistemas, os insumos que são recursos a serem transformados diretamente em produtos; subsistema de conversão/transformação que é o subsistema que transforma os insumos em produtos finais, e está diretamente ligada ao tipo de entradas a serem transformadas; subsistema de controle que são conjuntos de atividades que visa assegurar que as programações sejam cumpridas, que padrões sejam estabelecidos, que recursos sejam usados de forma eficaz e que a qualidade desejada seja obtida e por fim o quarto subsistema são as saídas.

### 2.2.1 Tipos de sistema de produção

Para Perales (2001), uma das utilidades da classificação dos sistemas de produção é permitir discriminar grupos de técnicas de planejamento e gestão da produção apropriada para cada tipo de sistema, o que racionaliza a escolha e a tomada de decisão sobre qual delas adotar em determinada circunstância.

Segundo Tubino (2009), a classificação dos sistemas produtivos tem por finalidade facilitar o entendimento das características inerentes a cada sistema de produção e sua relação com a complexidade das atividades de planejamento e controle destes sistemas. O autor classifica os sistemas produtivos basicamente em quatro formas:

- a) sistemas de produção contínuos: são empregados quando existe alta uniformidade na produção e demanda de bens ou serviços, fazendo com que os processos produtivos sejam totalmente interdependentes, favorecendo a sua automatização e sincronização, o *lead time* produtivo é baixo e favorece a disponibilidade de estoques de produtos.
- b) sistema de produção em massa: são os sistemas empregados na produção em grande escala de produtos altamente padronizados, porém não são passíveis de automatização em processos contínuos exigindo mão de obra especializada na transformação do produto, o *lead time* produtivo é baixo e também favorece a disponibilidade de estoques de produtos para atender aos clientes.
- c) sistemas de produção repetitivos em lotes: se caracteriza pela produção de um volume médio de bens ou serviços padronizados em lotes, que segue uma série de operações que necessitam ser programadas à medida que as operações anteriores forem sendo realizadas, trata-se de um sistema produtivo relativamente flexível, equipamentos pouco especializados normalmente agrupados em centros de trabalhos denominados departamentos, a mão de obra é mais polivalente, o *lead time* produtivo é maior do que o do sistema de produção em massa.
- d) sistemas sob encomenda: Atende a necessidades especiais dos clientes, apresenta demanda baixa, tendendo a uma unidade, alto custo produtivo, *lead time* produtivo normalmente alto e necessita possuir alta flexibilidade dos recursos produtivos com foco no atendimento das especificações dos clientes.

## 2.2.2 Sequenciamento da produção

O sequenciamento da produção de uma forma geral trata-se de decisões tomadas pelo setor de planejamento da produção diante de uma série de ordens de produção visando aproveitar os recursos disponíveis, máquinas, estoque de matéria-prima, *lead time* produtivo, capacidade produtiva disponível, data de entrega, tempo de *setup* de máquinas entre outras variáveis (TUBINO, 2009).

Segundo Pinedo (1995), o sequenciamento é um processo de tomada de decisões que existe na maioria dos sistemas de manufatura e produção, assim como na maioria dos ambientes de processamento de informações. O sequenciamento existe também em configurações de transportes e distribuições e outros tipos industriais de serviços.

Para Tubino (2009), em sistema de produção em lotes, a função do sequenciamento da produção é crítica para o desempenho do sistema, pois, na maioria dos casos, a maior parcela do *lead time* de um produto fabricado em lotes compreende o tempo em que o lote desse produto aguarda para ser processado em um recurso, sendo que caso a função não esteja bem estruturada, esse tempo de espera pode atingir 80% do tempo total.

Segundo Sellitto, Borchardt e Pereira (2008), o *lead time* de ordens produção pode ser dividido em componentes de tempo, que são afetados por fatores, os tempos e fatores são:

- a) tempo de emissão física da ordem, mais afetado por atividades comerciais;
- b) tempo da tramitação da ordem até o chão de fábrica, mais afetado pelo sistema de informações de manufatura;
- c) tempo de coleta de materiais, mais afetado pela situação do estoque e políticas de compra;
- d) tempo de transporte dos materiais até o centro de trabalho, mais afetado pela logística interna da manufatura;
- e) tempo de espera em filas, mais afetado pela lógica de programação;
- f) tempo de preparação das máquinas, mais afetado pelo estado da arte da tecnologia da manufatura;
- g) tempo de processamento e inspeção, mais afetado pela capacidade;
- h) tempo de movimentação até o próximo processo, mais afetado pela logística interna;
- i) tempo de inspeção final do cliente e possíveis retrabalhos, mais afetado pela relação com o cliente e especificações corretas do produto.

Para Tubino (2009), nos processos contínuos e nas linhas de montagem os itens fluem rapidamente, enquanto que nos processos em lotes os *lead times* são formados por uma

sequência, os lotes passam em centros de trabalhos, este tipo de processo possuem quatros tempos distintos: tempo de espera é o tempo que o lote aguarda para ser processado no centro de trabalho; tempo de processamento é o tempo gasto na transformação da matéria prima, esse tempo é o único que realmente agrega valor ao cliente; tempo de inspeção é o tempo despendido para verificar se o item produzido está de acordo com as especificações exigidas e tempo de transporte é o tempo de movimentação até o próximo centro de trabalho.

Diante disso, o sequenciamento da produção é muito importante e delicado, pois influencia diretamente o *lead time* de produção.

### 2.2.3 Regras de sequenciamento da produção

Segundo Silva et al. (2012), as regras de sequenciamento de produção é o ato de lançamento de ordens, peças ou tarefas no sistema de produção.

Segundo Tubino (2009), as regras de sequenciamento são heurísticas usadas para definir qual dos lotes da fila de um grupo de recursos terá prioridade de processamento, bem como qual recurso deste grupo será carregado com a ordem de produção, normalmente as regras de sequenciamento relacionam o tempo de processamento e a data de entrega.

Para Tubino (2009), as regras de sequenciamento podem ser classificadas de várias formas: em regras estáticas, que não alteram prioridades quando ocorrem mudanças no sistema produtivo e regras dinâmicas, que ao contrário da estática, acompanham as mudanças do sistema produtivo, alterando as prioridades, podem ser classificadas também em regras locais que considera a situação da fila de trabalho em um recurso e regras globais, que consideram as informações de outros recursos, outra forma de classificação tem-se regras de prioridade simples, que levam em consideração regras simples como a data de entrega, tempo de folga, tempo de processamento e outros, regras com índices ponderados, que adotam alguns pesos para as regras simples, formando um índice composto que define as prioridades e por fim regras heurísticas que são compostos por técnicas de inteligência artificial, algoritmo genéticos e simulação.

Um conceito muito importante para as regras de sequenciamento é o de gargalo. O gargalo é um ponto do sistema produtivo que limita a sua atuação, todo sistema produtivo possui limitações, sejam internas e externas (TUBINO, 2009).

De acordo com Almeida, Almeida e Medeiros (2009), os gargalos impedem que a capacidade produtiva de um sistema seja aproveitada plenamente, aumentando o tempo de processamento dos pedidos e consequentemente o custo operacional.

Segundo Corrêa e Giancesi (1996), uma forma de amenizar o gargalo é criar um *time buffer* antes do recurso gargalo, ou seja, programam-se os materiais para chegarem ao recurso-gargalo antes da sua operação.

Para Tubino (2009), a teoria das restrições, difundida por Goldatt e Fox a partir da década de 70, foi à pioneira em explorar o conceito de gargalo aplicando em regra de sequenciamento, para isso utilizou um *software* comercialmente conhecido como *Optimized Production Technology* (OPT). Algumas regras de sequenciamento com foco no gargalo foram definidas, sendo as principais descritas a seguir:

- a) A taxa de utilização de um recurso gargalo não é definida pela sua capacidade produtiva, mas depende de alguma outra restrição do sistema;
- b) Uma hora perdida em um recurso gargalo é uma hora perdida em todo sistema produtivo, por isso como em um recurso gargalo não existe tempo ocioso, deve-se aproveitar os períodos em que o recurso gargalo não esteja sendo utilizado para realizar manutenções e *setups*;
- c) Os lotes de processamento precisam ser variáveis não fixos, nos recursos gargalo os lotes devem ser grandes para diluir os tempos de preparação, porém em recursos não gargalo os lotes devem ser pequenos para evitar estoque no processo e adiantar o fluxo de produção dos gargalos;
- d) Os lotes de processamento e de transferência não precisam ser iguais, ou seja, quando parte de um lote já estiver processado não precisa aguardar o resto para ser movimentado, isto reduz o *lead time*.
- e) Os gargalos comandam tanto o fluxo como os estoques do sistema, a regra de sequenciamento deve garantir que não falte insumos para o recurso gargalo, deve projetar estoques de segurança na frente dos mesmos buscando evitar interrupções no fluxo.

Apesar das regras para sequenciamento citadas acima estarem bem definidas, Tubino (2009), ressalta que na prática não são fáceis de aplicar em sistemas de produção em lote. O autor sugere cinco passos como forma de direcionar as ações da programação da produção dentro das regras de sequenciamento, os passos sugeridos são:

- a) Identificar os gargalos do sistema;
- b) Programar a máxima utilização dos recursos gargalo;
- c) Programar os recursos não gargalo em função dos gargalos;
- d) Investir em primeiro lugar no aumento da capacidade produtiva dos recursos gargalo;

- e) Após alteração das condições do recurso gargalo, voltar ao passo 1, acima, e verificar o sistema novamente.

#### 2.2.4 Problemas de programação da produção (*Scheduling*)

O planejamento e controle da produção (PCP) em ambientes de manufatura envolve o que, quando e quanto produzir e comprar, além dos recursos necessários e não é uma tarefa fácil de ser realizada e relaciona dentre outras atividades, o sequenciamento (*scheduling*) da produção (DOMINGOS et al., 2008).

Os problemas de programação da produção ou *scheduling* tratam-se dos procedimentos de alocação de recursos e equipamentos, num determinado período de tempo, para executar o processamento de tarefas (RODRIGUEZ, 2009).

Segundo Stebel et al. (2003), o *scheduling* possui três elementos fundamentais, que são:

- a) a designação dos recursos, que envolve a escolha de um conjunto de recursos específicos para uma atividade conhecida;
- b) o sequenciamento de atividades, que define a ordem de execução das atividades designadas para os recursos;
- c) a determinação do tempo de utilização dos recursos pelas respectivas atividades, que se trata da determinação dos tempos de início e término de cada atividade.

O *scheduling* considera períodos curtos, como por exemplo, dias ou semanas, sendo requerido quando existe competição entre atividades por recursos limitados dentro de um horizonte de tempo definido. Muitos problemas de *scheduling* da produção podem ser considerados como problemas de programação linear inteira mista, uma vez que os modelos matemáticos de otimização correspondentes, envolvem variáveis contínuas e discretas que devem satisfazer a um conjunto de restrições lineares de igualdade e desigualdade (STEBEL et al., 2003).

Segundo Pinedo (2008) os problemas de *scheduling* possuem inúmeras causas e combinações, para resolver tais problemas existem vários modelos, alguns destes modelos são descritos a seguir.

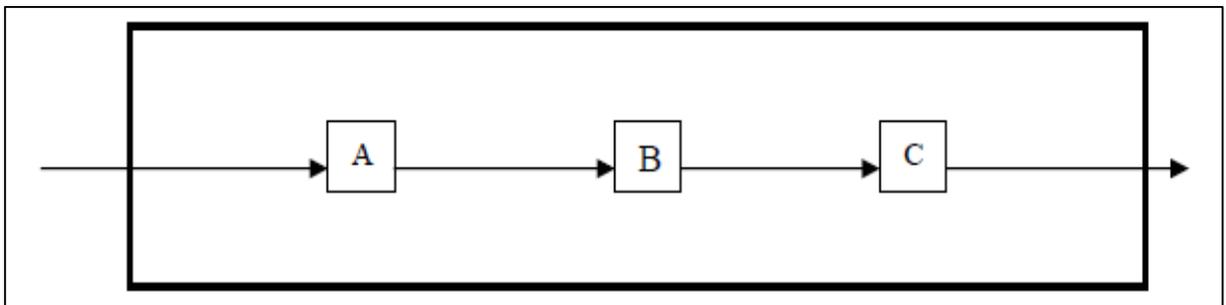
### 2.2.4.1 Flow Shop

Um modelo de sequenciamento da produção *flow shop*, segundo Pinedo (2008), é quando existem  $m$  máquinas em série. Cada trabalho tem de ser processado em cada uma destas máquinas. Todos os trabalhos têm de seguir o mesmo caminho (todos têm de ser processados primeiro na máquina um, depois na máquina dois e assim sucessivamente). Depois de ser concluído em uma máquina, um trabalho é inserido na fila da próxima máquina.

O modelo *flow shop* é uma forma de organização do sistema de produção com capacidade de escala, ou seja, capaz de processar altos volumes, mas capacidade limitada de escopo, todos os produtos/itens visitam máquinas e estações na mesma sequência e são caracterizados por baixos *lead times* e baixos níveis de *Work In Process* (WIP) (KRAJEWSLI; RITZMAN, 1996 apud SILVA, 2005).

Tem-se, para este caso, o *layout* por produto em que as estações de trabalho ou departamentos são arranjadas de uma maneira linear, como mostrado na figura 2.

Figura 2 - Representação esquemática do sistema *flow shop*



Fonte: Autor, “adaptado de” Silva, 2005, p. 10

O ambiente de produção *flow shop* é um caso particular do ambiente *job shop*, em que as  $n$  tarefas têm o mesmo roteiro nas  $m$  máquinas. Dessa forma, a formulação do *job shop* pode ser adaptada para o *flow shop* (PINEDO, 2008).

O problema tradicional de programação *flow shop* é um problema de produção onde um conjunto de  $n$  tarefas deve ser processado, na mesma sequência, por um conjunto de  $m$  máquinas. Quando a ordem de processamento em todas as máquinas for a mesma, tem-se o ambiente de produção *flow shop* permutacional, onde o número de possíveis programações para  $n$  tarefas é  $n!$  (NAGANO; MOCCELLIN; LORENA, 2005).

O problema consiste em obter uma sequência das tarefas que otimiza uma determinada medida de desempenho. Nos modelos para solução de problemas *flow shop*, as medidas

usuais referem-se à minimização da duração total da programação (*makespan*), associada à utilização eficiente dos recursos produtivos, e à minimização do tempo médio de fluxo (*mean flow time*), associado à redução do estoque em processamento (NAGANO; MOCCELLIN; LORENA, 2005).

Segundo Rodriguez (2009), as hipóteses usuais do problema de programação de tarefas *flow shop* são:

- a) Cada máquina está disponível continuamente, sem interrupções;
- a) Cada máquina pode processar apenas uma tarefa de cada vez;
- b) Cada tarefa pode ser processada por uma máquina de cada vez;
- c) Os tempos de processamento das tarefas nas diversas máquinas são determinísticos e fixos;
- d) As tarefas têm a mesma data de liberação, a partir da qual, qualquer uma pode ser programada e executada;
- e) Os tempos de preparação das operações nas diversas máquinas são incluídos nos tempos de processamento e independem da sequência de operações em cada máquina;
- f) As operações nas diversas máquinas, uma vez iniciadas não devem ser interrompidas.

#### **2.2.4.2 Flow Shop Flexível**

Segundo Pinedo (2008), o modelo de sequenciamento *flow shop* flexível é uma generalização do *flow shop*, porém com máquinas em paralelo. Ao invés de  $m$  máquinas em série, existem  $c$  centros de trabalho agrupando máquinas idênticas que funcionam em paralelo. Cada trabalho tem que ser processado no centro de trabalho um, dois e assim sucessivamente. Um trabalho é processado em uma máquina de um centro de trabalho, mas todas as máquinas deste centro poderiam processá-lo da mesma forma.

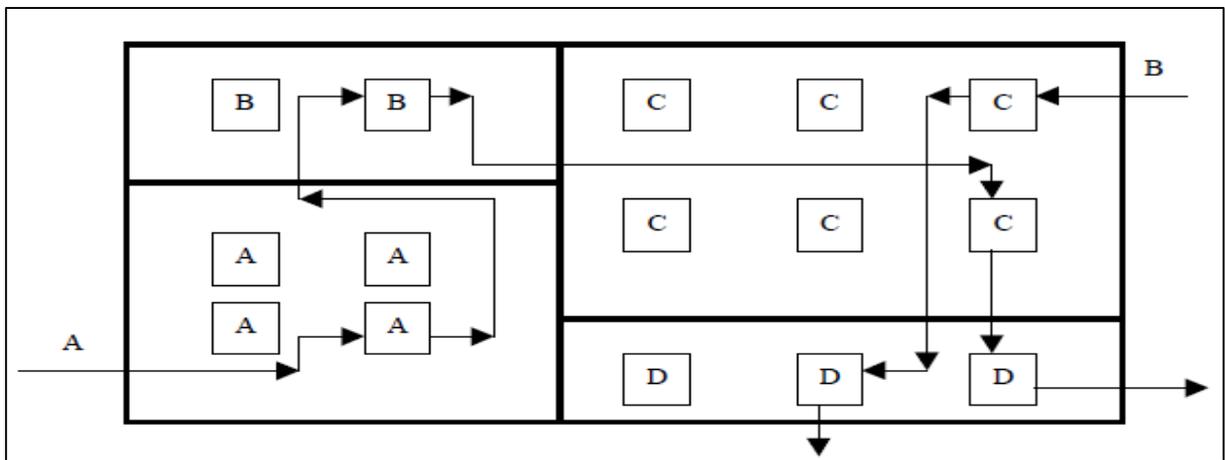
#### **2.2.4.3 Job Shop**

O modelo de sequenciamento *job shop*, segundo Pinedo (2008), é definido com um modelo com  $m$  máquinas, sendo que cada *job* tem uma rota pré-determinada para seguir. No problema de *job shop* cada trabalho somente é escalonado uma única vez e para qualquer máquina, também cada máquina pode processar um trabalho por vez, sendo que nenhuma

máquina pode ser liberada antes de finalizada a operação e o total de máquinas de cada tipo é fixo e igual a um.

O modelo *job shop* é uma forma organizacional do sistema de manufatura com capacidade de processamento de vários tipos de *jobs*, mas com limitação em capacidade de escala devido aos problemas associados ao controle e movimentação dos *jobs* e ao tempo de preparação (*setup time*) das máquinas. Este sistema também é referenciado como *layout* por processo ou funcional, como mostrado na figura 3, dado que máquinas desempenhando funções semelhantes são agrupadas em um mesmo departamento (SILVA, 2005).

Figura 3 - Representação esquemática do sistema de manufatura *job shop*



Fonte: Autor “adaptado de” Silva, 2005, p. 10

As máquinas podem ser intercambiáveis, ou seja, uma mesma máquina pode realizar operações em itens ou produtos pertencentes a classes diferentes, o que exige um determinado tempo de preparação das máquinas, por isso o sistema é caracterizado por longos *lead times* e altos níveis de inventário em processo *Work In Process* (WIP) (KRAJEWSLI; RITZMAN, 1996 apud SILVA, 2005).

Segundo Cheung e Zhou (2001) *job shop* é um ambiente de produção com  $n$  tarefas e  $m$  máquinas, em que cada tarefa é processada nas  $m$  máquinas, de acordo com um roteiro pré-estabelecido.

Encontrar a solução ótima para um problema de *job shop*, é normalmente uma tarefa difícil, pois existem  $(n!)^m$  soluções possíveis. Dessa forma pode-se encontrar a solução ótima num intervalo de tempo reduzido somente para problemas envolvendo um pequeno número de máquinas e tarefas (CHEUNG; ZHOU, 2001).

Em muitas situações práticas, não é possível encontrar uma solução ótima, sendo suficiente uma solução sub-ótima. Devido a essa dificuldade, têm sido desenvolvidos, com bons resultados, diversos métodos heurísticos onde o procedimento utilizado consiste em especificar uma regra de prioridade para selecionar uma operação entre as diversas operações candidatas a serem realizadas em uma mesma máquina (RODRIGUEZ, 2009).

Segundo Domingos et al. (2008), as principais regras de prioridade utilizadas em problemas de *job shop* são:

- a) menor tempo de processamento *shortest processing time* (SPT), em que ocorre a seleção do trabalho com o menor tempo de processamento no processo em análise;
- b) maior tempo de processamento *longest processing time* (LPT), em que ocorre a seleção do trabalho com o maior tempo de processamento no processo em análise;
- c) maior tempo de processamento restante *most work remaining* (MWKR), onde é priorizada a peça que possui o maior tempo de trabalho acumulado nos processos seguintes;
- d) menor tempo de processamento restante *least work remaining* (LWKR), onde é priorizada a peça que possui o menor tempo de trabalho acumulado nos processos seguintes;
- e) data de entrega mais próxima *earliest delivery date* (EDD), onde é selecionado o trabalho com a data mais próxima para entrega;
- f) primeiro a chegar, primeiro a ser executado *first-come, first-served* (FCFS), em que se realiza o trabalho que está mais tempo na fila;
- g) folga por operação restante *slack per remaining operation* (SRO), onde se seleciona o trabalho com menor folga por operações restantes.

A escolha da regra de prioridade depende de qual critério deseja-se melhorar, visto que não existe uma regra única que englobe simultaneamente critérios como, por exemplo, mínimo tempo de ciclo, mínimo tempo de peças em atraso e mínima ociosidade dos equipamentos (MONTEVECHI et al., 2002).

Para Domingos et al. (2008) uma alternativa que vêm sendo utilizada por diversos autores para solucionar os problemas de *job shop* é a simulação computacional, segundo os autores a idéia central é experimentar uma prática antes de sua implementação, é uma alternativa à experimentação real, cujos custos seriam mais elevados.

#### 2.2.4.4 *Job Shop Flexível*

Para Pinedo (2008), o *job shop* flexível é uma generalização do *job shop*, porém com as máquinas em paralelo. Ao invés de  $m$  máquinas, existem  $c$  centros de trabalho agrupando máquinas idênticas que funcionam em paralelo. Cada trabalho tem sua própria rota a seguir através da fábrica. Um trabalho é processado em uma máquina de um centro de trabalho, porém todas as máquinas deste centro poderiam processá-lo da mesma forma.

#### 2.2.4.5 *Open Shop*

Segundo Oliveira; Turrioni (2012), os *open shops* são o tipo mais geral e flexível dos problemas de planejamento da produção, nesse tipo de problema não existem rotas específicas para cada tarefa ou produto, elas podem ser fabricadas em qualquer máquina do sistema e suas operações podem seguir qualquer ordem de fabricação sem afetar o bom andamento do processo.

De acordo Pinedo (2008), o modelo de sequenciamento *open shop* é definido quando existem  $m$  máquinas e cada *job* (trabalho) tem de ser processado novamente em cada uma destas  $m$  máquinas. Mesmo assim, alguns destes tempos de processamento podem ser zero. Não existe restrição com relação ao caminho de cada *job* através das máquinas. A sequência permite que cada caminho seja determinado por cada *job* e diferentes *jobs* podem ter diferentes caminhos.

Outros modelos que em função do fluxo das operações nas máquinas auxiliam na solução de problemas de tarefas em sistema de produção são descritos a seguir (NAGANO; MOCCELLIN, 2005).

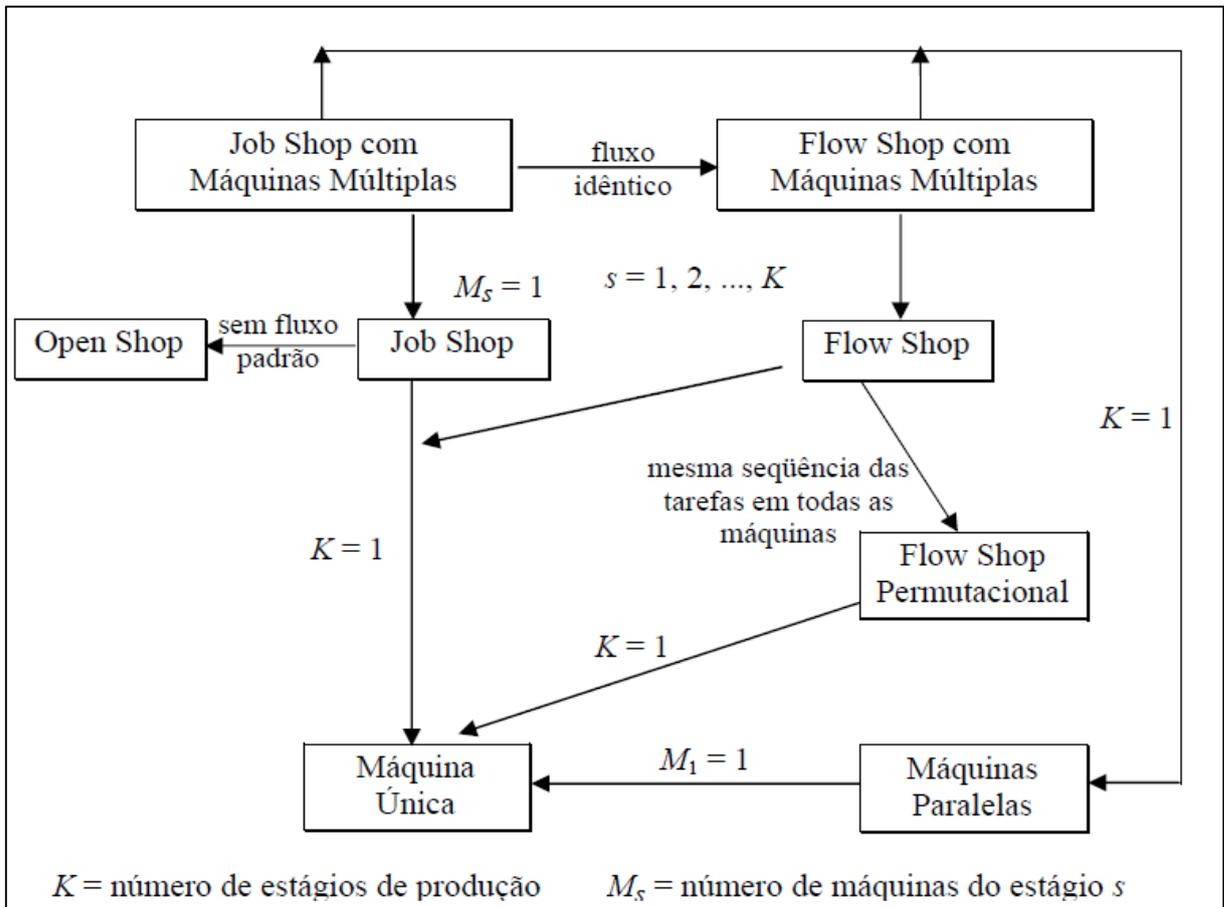
- a) máquina única: existe uma única máquina para o processamento das tarefas;
- b) máquinas paralelas: são disponíveis diversas máquinas, geralmente idênticas, para as mesmas operações;
- c) *job shop* com máquinas múltiplas: é um *job shop* no qual existe um conjunto de máquinas paralelas em cada estágio de produção;
- d) *flow shop* com máquinas múltiplas: consiste em um *flow shop* no qual existe um conjunto de máquinas paralelas em cada estágio de produção;

Como foi visto, devido ao grande número de arranjos possíveis entre as diferentes máquinas que compõem cada processo, justifica a divisão do problema de controle da

produção a alguns subproblemas tradicionais, hoje em dia já bem explorados pela literatura (OLIVEIRA; TURRIONI, 2012).

Na figura 4 é representada uma possível classificação dos problemas de planejamento da produção, bem como um resumo dos modelos propostos acima.

Figura 4 - Relação entre as classes de problemas de programação da produção em máquinas



Fonte: Nagano; Moccasin, 2005, p. 177

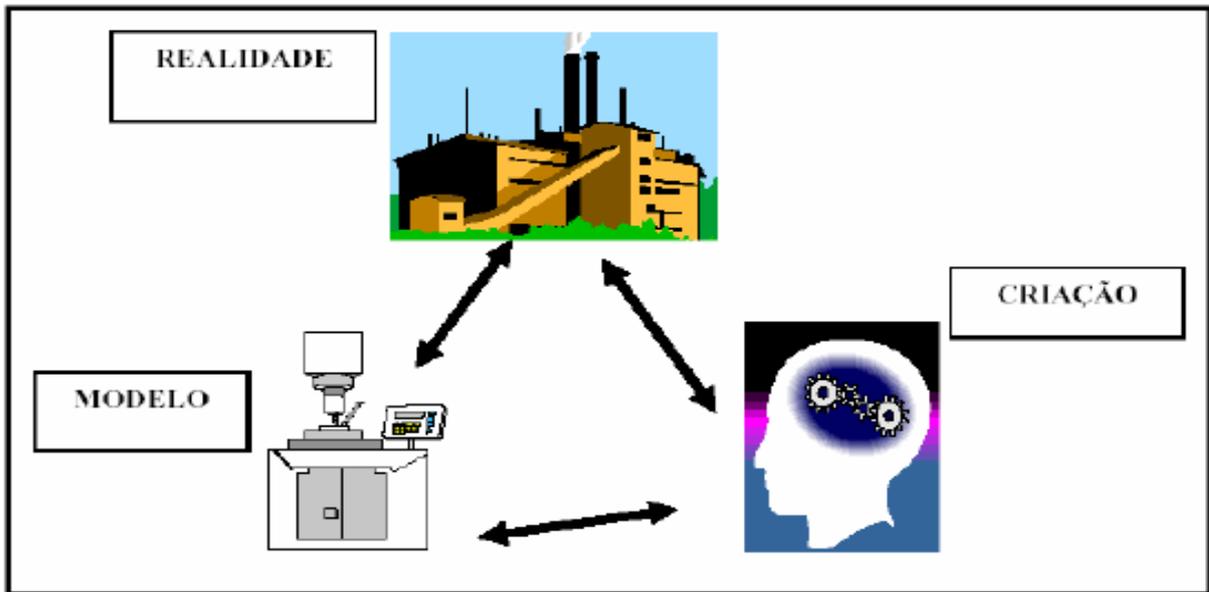
## 2.3 SIMULAÇÃO

A simulação envolve a geração de uma história artificial do sistema que se deseja analisar, realizar observações e inferências nas características de funcionamento desse sistema que está sendo representado (BANKS, 1999).

Segundo Maria (1997), no seu sentido mais amplo a simulação é uma ferramenta para avaliar o desempenho de um sistema, existente ou proposto, sob diferentes configurações de interesse e durante longos períodos de tempo.

A simulação é uma ferramenta que permite criar um modelo da realidade e posteriormente com os resultados aplicar na realidade. A figura 5 ilustra esse conceito.

Figura 5 - Transformação da realidade em modelo



Fonte: Brighenti, 2006, p 78

Segundo Brighenti (2006), o processo de simulação segue o método científico, ou seja, formula as hipóteses, prepara o experimento, testa as hipóteses através do experimento e valida às hipóteses através dos resultados obtidos.

Ainda para Brighenti (2006), a simulação não substitui o trabalho de interpretação humana, mas fornece resultados para análises mais elaboradas a respeito da dinâmica do sistema, permitindo desta forma uma interpretação mais profunda e abrangente do sistema estudado.

Devido a sua grande versatilidade e flexibilidade, a simulação é largamente utilizada em operações técnicas e atividades de pesquisa (LOBÃO; PORTO, 1999).

Segundo Lobão e Porto (1999), algumas das muitas áreas de aplicação da simulação são: sistemas de computação, sistemas de manufatura, negócios, entidades governamentais, ecologia, meio-ambiente, sociedade e comportamento, biociências e etc.

Além da forte contribuição na melhoria nas questões da manufatura, a simulação pode ser uma ferramenta muito útil na área de serviços, e as principais aplicações são: avaliação do quadro de funcionários nas empresas prestadores de serviço, melhoria dos procedimentos, saúde, agendamento de pacientes, fluxo de pacientes entre os departamentos, utilização mútua de serviços, questões logísticas dos serviços, estocagem e movimentação de componentes e

materiais, gerenciamento dos inventários de produtos acabados, processamento de pedidos, manutenção no processo sem afetar a capacidade operacional do serviço, logísticas relacionadas à limpeza ambiental e manuseio de resíduos.

A simulação é utilizada antes da alteração do sistema, ou antes, da construção de um novo sistema, para reduzir as chances de incapacidades de atender as especificações, para eliminar imprevistos de gargalos, para evitar falta ou sobra de recursos e para otimizar o desempenho do sistema (MARIA, 1997).

Segundo Kumar e Phrommathed (2005), o mapeamento do processo, análise dos dados e simulação computacional reduz o risco de ineficiência de propostas de melhoria das operações de fabricação. Os autores realizaram um estudo para verificar melhorias no processo de corte de folhas de papel em uma indústria de celulose e papel da Tailândia, eles utilizaram o mapeamento do processo, análise de dados e simulação computacional e conseguiram obter resultados mais eficientes para a tomada de decisão.

### **2.3.1 Justificativa econômica da simulação**

A simulação computacional vem a ser a representação de um sistema real através de um modelo de grande precisão utilizando o computador, tendo como vantagem poder visualizar esse sistema, implementar mudanças, responder questões do tipo: “o que aconteceria se”, desta maneira economizando recursos econômicos e tempo (PEREIRA, 2000).

Um sistema pode ser, basicamente, analisado de duas formas: experimentação com o sistema atual e experimentação com modelos do sistema (BERGUE, 2000).

Na experimentação com o sistema atual, os efeitos da mudança são analisados no próprio sistema, após sua implementação. Esta alternativa geralmente apresenta riscos e custos elevados, podendo ainda estar sujeita a restrições físicas e temporais.

Na experimentação com modelos do sistema, estes apresentam uma simplificação da realidade, através do qual se procura identificar e destacar os elementos da realidade que sejam os mais importantes para a decisão a ser tomada. Tal experimentação apresenta quando comparada com a experimentação da realidade, baixo custo, maior segurança e rapidez (LAW; KELTON, 1991 apud BERGUE, 2000). Sendo que a abrangência da realidade no processo de modelagem é substituída pelo poder de análise e capacidade de experimentação.

Para Kellner, Madachy e Raffo (1998), o maior motivo para o desenvolvimento de um modelo de simulação ou qualquer outro método de modelagem é que se trata de uma forma

barata de obter resultados importantes quando os custos, riscos ou logística de se manipular o sistema real de interesse são proibidos.

Os principais ganhos com a simulação são obtidos com a identificação e eliminação de problemas e ineficiências, chegando até a verificação da inviabilidade do projeto antes da implantação (BRIGHENTI, 2006).

A simulação é uma ferramenta que permite a análise econômico-financeira de investimentos em projetos envolvendo novos equipamentos e projetos (ALVES, 2012). Os custos estimados com o uso da simulação computacional em um projeto situam-se entre 1% e 3% do custo total do projeto.

Uma das dificuldades da justificativa econômica da simulação é o fato de geralmente não se conseguir avaliar qual será a economia gerada no projeto, conseguindo-se obter esse valor apenas no final do projeto (GLENNEY; GERALD, 1985 apud ALVES, 2012).

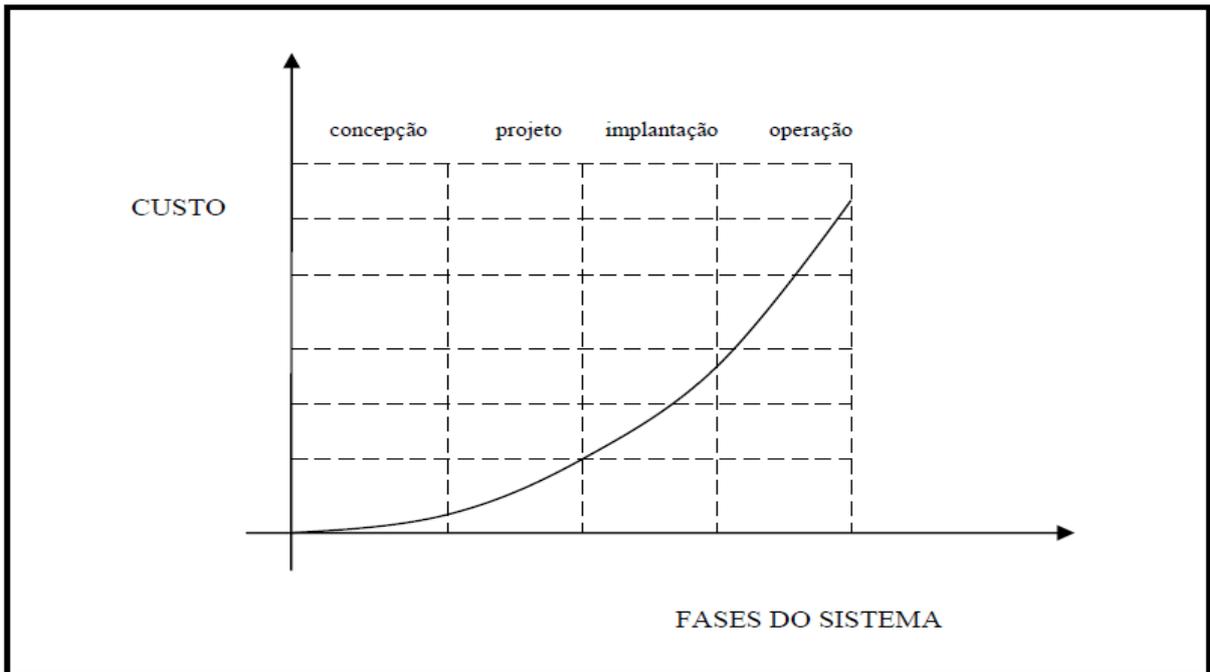
Com a simulação tem-se um menor custo se comparado com os custos de realizar as experimentações diretas, que envolvem grandes somas em dinheiro, equipamentos e pessoas, e que nem sempre se alcança os resultados esperados.

Segundo Lobão e Porto (1997), quando são necessárias informações a respeito de sistemas ainda não implementados ou informações sobre modificações em modelos já em operação, a simulação é a alternativa que apresenta a melhor relação custo/benefício para obtenção de tais informações.

No desenvolvimento de um projeto ou sistema passa-se por diferentes fases, com características diferentes entre si, ou seja, cada uma com seu tempo e custo (BRIGHENTI, 2006). A figura 6 ilustra a relação entre as diferentes fases de um projeto e seu custo.

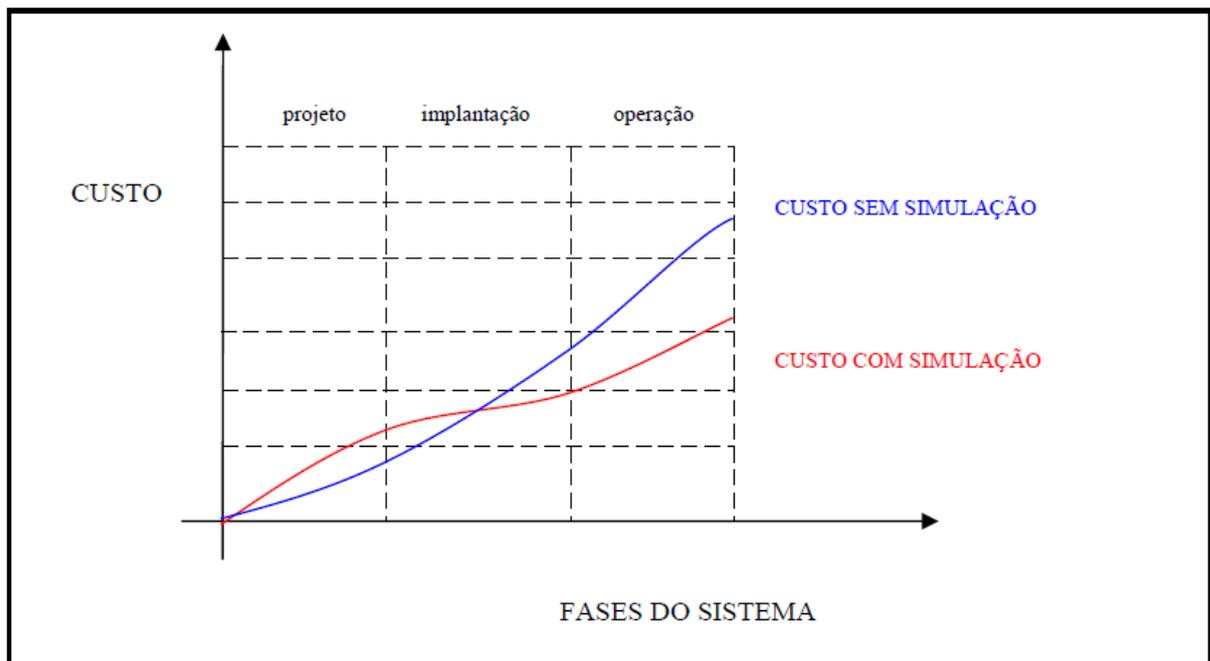
Quando a simulação é aplicada no desenvolvimento do projeto ou sistema, a relação entre as fases do projeto e custo é modificada. Na figura 7 tem-se a relação entre as fases do projeto com os custos quando há aplicação da simulação.

Figura 6 – Relação entre às diferentes fases de um projeto e seu custo



Fonte: Duarte, 2003, p. 65

Figura 7 – Relação entre os custos com e sem aplicação da simulação



Fonte: Duarte, 2003, p. 65

A fase de concepção do projeto não sofre nenhuma alteração, pois a aplicação da simulação é realizada após esta etapa.

Em um sistema ou projeto onde ocorre a aplicação da simulação a fase de projeto possui um custo maior em relação a um estudo sem a aplicação do sistema, isto, pois, é justamente nessa etapa que se consegue planejar um sistema mais otimizado e conseqüentemente na etapa de implantação e operação é que se obtém a esperada redução dos custos (HARREL et al., 2002).

A área sob as curvas dos custos da figura 7, quando se aplica a simulação é menor do que quando não é aplicada a simulação, isto mostra o menor custo total final no sistema ou projeto quando se aplica a simulação.

### 2.3.2 Definição de sistema

Um sistema é um conjunto organizado de entidades, tais como pessoas, equipamentos, métodos e peças, que trabalham juntos em direção a um objetivo específico (HARREL et al., 2002). Ainda segundo os mesmos autores, um modelo de simulação caracteriza matematicamente um sistema através da descrição de respostas que podem resultar da interação entre as entidades.

Para Seila (1995), um sistema é um componente ou entidade que se interagem ou trabalham juntos para atingir algum objetivo. São exemplos: hospitais, *check-in* de aeroportos, telecomunicações, tráfego, policial, econômico, bancários entre outros.

Segundo Brighenti (2006), um sistema pode ser uma parte ou um conjunto no qual o estudo será realizado, que pode estar inserido em um universo ainda maior. Um exemplo dessa situação é a área responsável pelo saque e depósito de uma agência bancária.

Cada sistema possui seu grau de complexidade e uma ação entre as variáveis do sistema, de modo a produzir um resultado que envolve interdependências que podem ser simples (poucas variáveis) ou mais elaboradas (muitas variáveis) (DUARTE, 2003).

Segundo Harrel et al. (2000 apud DUARTE, 2003), a interdependência liga um elemento do sistema a outro de forma que a ação sobre esse elemento causa uma reação em cadeia no sistema, quanto maior o número de variáveis que interligam os elementos, mais complexo será esse sistema.

A variabilidade é uma característica inerente a qualquer sistema que envolva pessoas e máquinas, uma vez que ambas podem falhar. Diante disso, quando é introduzido em um sistema à interdependência e a variabilidade, este se torna muito complexo para que uma pessoa possa compreendê-lo e prever o seu comportamento sem o uso de ferramentas como a simulação, e que considere fatores de interdependência e aleatoriedade (DUARTE, 2003).

Quanto maior for à complexidade do sistema menor será sua previsibilidade devido ao maior número de variáveis e inter-relações existentes. Na figura 8 existe uma comparação entre diversos tipos de sistema com sua previsibilidade sem e com o uso da simulação.

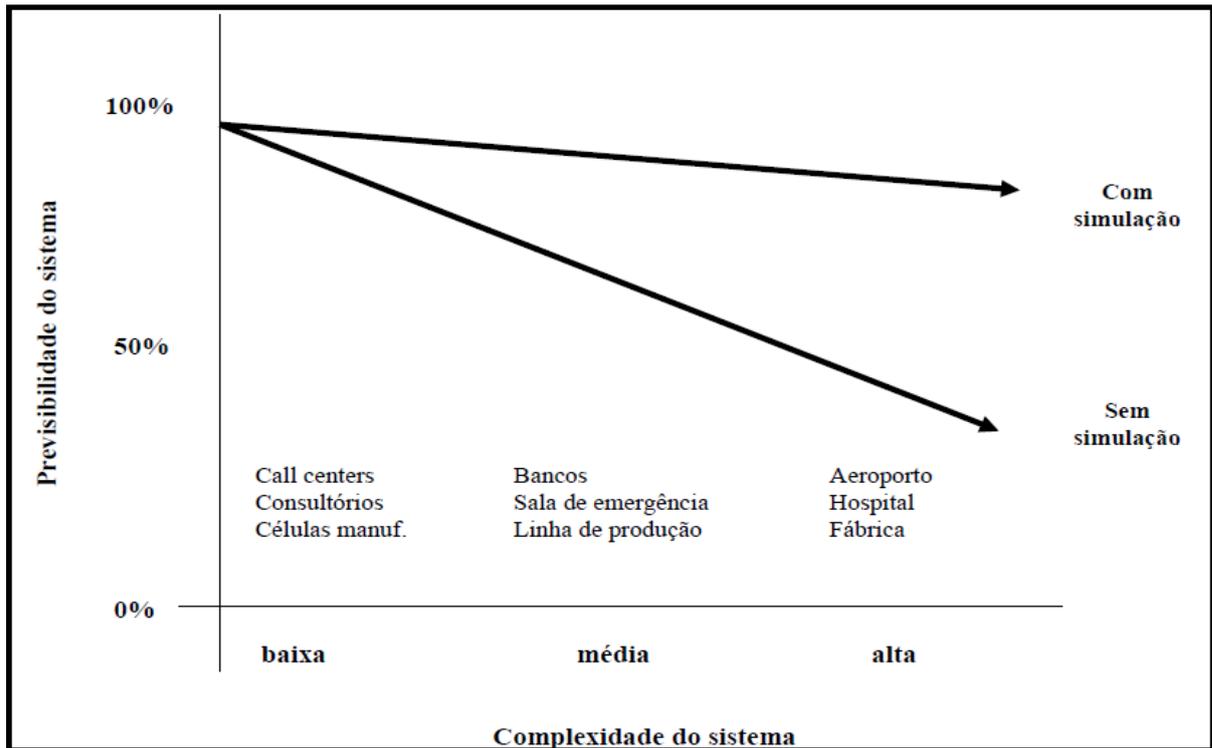
Segundo Harrel et al. (2002), a simulação pode ocorrer em dois tipos de eventos:

- a) evento discreto: é uma ação instantânea que ocorre em um único momento e a ocorrência destes eventos pode causar mudanças no estado do sistema. São exemplos de eventos discretos: um avião aterrizando em um aeroporto, um caminhão chegando a uma doca de entrega, um cliente entrando em um banco e uma máquina terminando um ciclo.
- b) evento contínuo: é uma ação que não para, ela continua ininterruptamente com relação ao tempo, envolvem uma taxa temporal de mudança, normalmente representada por equações diferenciais. Alguns exemplos simples de eventos contínuos são: a temperatura da água em um rio subindo e descendo durante o dia, o fluxo de óleo em um tanque e conversões químicas.

De acordo com Pereira (2000), alguns softwares foram desenvolvidos para modelar sistemas discretos, contínuos ou quando ocorre a combinação dos dois. Segundo o autor, os sistemas são ditos discretos quando as variáveis envolvidas assumem valores finitos ou infinitos numeráveis, por exemplo, peças que chegam a uma máquina. Os sistemas contínuos ocorrem quando as variáveis mudam continuamente no tempo, por exemplo, os quilômetros rodados por um caminhão em um sistema logístico.

Em sistemas discretos, os programas de simulação possuem um relógio que avança à medida que cada evento acontece num determinado instante e avança até que o próximo evento seja programado. Enquanto em sistemas contínuos, como foi dito anteriormente, os programas de simulação devem ser próprios para resolver sistemas de equações diferenciais (HARREL et al., 2002; PEREIRA, 2000).

Figura 8 - Relação entre previsibilidade e complexidade do sistema



Fonte: Duarte, 2003, p. 70

### 2.3.3 Definição de modelo

De uma maneira bem genérica, um modelo é uma representação abstrata e simplificada de um sistema. O modelo representa os componentes mais importantes do sistema e mostram a maneira como eles interagem (SEILA, 1995).

Segundo Maria (1997), um modelo é uma representação da construção e funcionamento de algum sistema de interesse, um modelo deve ser similar, mas mais simples do que o sistema que ele representa, deve estar entre o realismo e a simplicidade. Um dos principais objetivos de um modelo é prever ao analista o efeito de alterações no sistema.

Segundo Andrade (2000), os modelos assumem um papel importante por permitir à pessoa envolvida com o problema algumas facilidades que são:

- a) visualização da estrutura do sistema real em análise;
- b) representação das informações e suas inter-relações;
- c) sistemática de análise e avaliação do valor de cada alternativa;
- d) instrumento de comunicação e discussão com outras pessoas.

Para Andrade (2000) dependendo da forma como o processo de decisão é abordado pelo analista e da própria natureza da decisão, pode-se encontrar diversos tipos de modelo, tais como:

- a) modelos conceituais: são aqueles que relacionam de forma sequencial e lógica as informações e a fase do processo de decisão, de forma a permitir o desenvolvimento controlado e consistente com os objetivos em mente;
- b) modelos matemáticos: são aqueles baseados na pressuposição de que todas as informações e variáveis relevantes do problema de decisão podem ser quantificadas, são utilizados símbolos matemáticos para representá-las e utiliza funções matemáticas para descrever as ligações entre as variáveis e as operações do sistema, os modelos matemáticos podem ser divididos em dois grandes tipos: modelos de simulação e modelos de otimização;
- c) modelos heurísticos: são aqueles construídos quando a complexidade do problema é de tal ordem que a utilização de relações matemáticas se torna impraticável ou extremamente dispendiosa. Os modelos construídos com base nas técnicas de inteligência artificial são exemplos de modelos heurísticos.

Este trabalho se enquadra no modelo matemático do tipo simulação, que foi conduzido com o auxílio de um programa específico para realizar a simulação.

Segundo Pereira (2000), os modelos matemáticos de simulação ou simplesmente modelos de simulação podem ser classificados em:

- a) estáticos: é o modelo que representa o sistema sem levar em conta sua variabilidade com o tempo, ou seja, é uma representação do sistema congelado num determinado momento;
- b) dinâmicos: é quando o modelo representa o sistema a qualquer tempo, por exemplo, os modelos que representam uma linha de produção durante um turno de 8 horas;
- c) determinísticos: quando as variáveis que dão entrada e que representam o sistema, assumem valores exatos, assim os resultados desse tipo de simulação serão sempre os mesmos, independentemente do número de replicações que se fizer para o modelo;
- d) estocástico: permite a entrada de uma coleção de variáveis, que podem assumir diversos valores dentro de uma distribuição de probabilidades, que pode ser definida pelo modelador. Os resultados gerados pelos modelos estocásticos são

diferentes a cada repetição, devido à natureza aleatória das variáveis que dão entrada no modelo.

#### **2.3.4 Simulação Computacional**

A simulação é a imitação da operação de um processo ou sistema real modelado com o auxílio do computador, ao longo do tempo. A simulação envolve a geração de uma história artificial do sistema e a verificação dos resultados quando se realiza inferências nas características de funcionamento do sistema real que está sendo representado (BANKS, 1999).

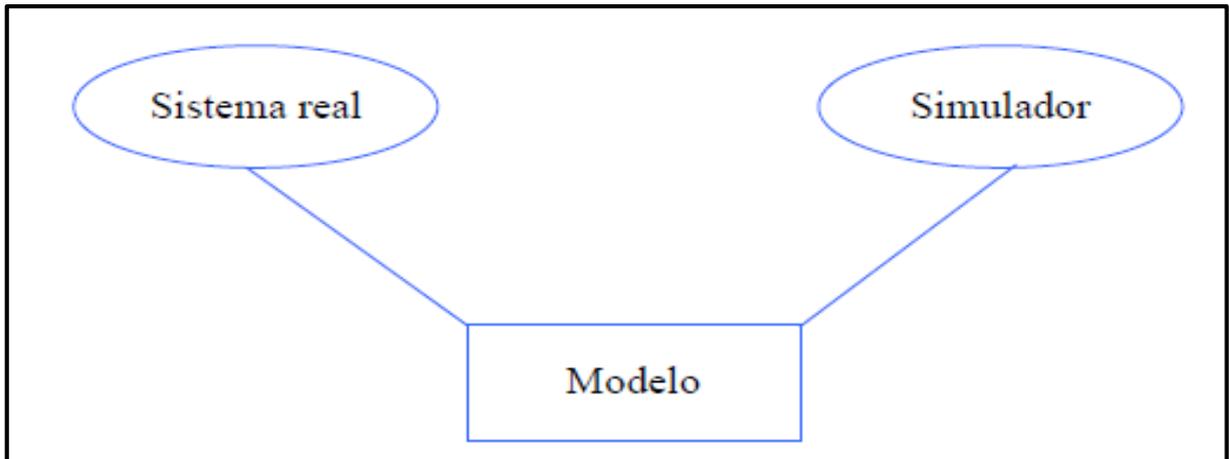
De uma forma genérica, a simulação computacional é a importação da realidade para um ambiente controlado, onde se pode estudar o comportamento do mesmo, sob diversas condições, sem os riscos físicos e/ou custos comparado com um estudo tradicional de melhoria.

A simulação é uma indispensável metodologia para resolver muitos problemas do mundo real, como já foi comentado um modelo é a representação de um sistema real e a simulação é uma ferramenta que utiliza esse modelo criado, para fazer experimentos e responder questões do tipo, o que aconteceria se, manipulando as entradas e verificando as saídas (BRIGHENTI, 2006).

Um exemplo de aplicação da simulação computacional é no treinamento de pilotos com o auxílio de simuladores de voo, em que os pilotos ficam em uma cabine que representa o modelo de um avião real, realizando manobras e sentindo a dinâmica do modelo e suas consequências. Dessa forma, a simulação é o resultado de uma série de ações no modelo que imitam as reações do ambiente.

A modelagem e simulação envolve basicamente a inter-relação entre três entidades, que são: o sistema real, o modelo e o simulador. Essas entidades não devem ser analisadas isoladamente. De uma forma bem sucinta, pode-se definir sistema real como a origem dos dados, o modelo como um grupo de instruções para a geração de dados e o simulador um dispositivo capaz de levar a diante instruções do modelo (MOREIRA, 2001). Na figura 9 é representada a relação entre as três entidades mencionadas acima.

Figura 9 - Relação entre sistema, modelo e simulador



Fonte: Moreira, 2001, p. 12

Para Harrel et al. 2002, uma simulação pode ser terminante ou não terminante. A simulação é terminante quando roda por um período predeterminado ou até que um evento específico ocorra, as análises e conclusões são baseadas nos valores de saída produzidas no ponto de parada. Os resultados de uma simulação terminante são usualmente dependentes dos valores iniciais e das quantidades especificadas no início da simulação, por esta razão, as condições de partida em modelos terminantes deveriam refletir com acuracidade as circunstâncias de partida exibidas no mundo real do sistema em estudo.

Como exemplo de simulação terminante tem-se a simulação do atendimento de caixas de supermercado, onde o objetivo poderia ser a determinação do número mínimo de caixas para atender a demanda de clientes.

Uma simulação não terminante ocorre quando o sistema é independente das considerações de partida iniciais, a análise destes modelos é baseada nos dados de saída gerados depois que as condições não terminantes (após a entrada em regime) são alcançadas (HARREL et al., 2002). O fato de a simulação ser dita não terminante significa que a partir de um determinado momento a simulação poderia continuar indefinidamente sem que estatisticamente o sistema venha a ter mudanças significativas de comportamento. A definição do tempo total de simulação vai depender então, dentre outros fatores, do tempo de aquecimento, período em que as variáveis estatísticas que deram entrada no sistema ainda não adquiram estabilidade (PEREIRA, 2000; HARRELL et al., 2002).

Como exemplo de simulação não terminante temos a simulação de uma linha de manufatura onde temos que esperar a estabilização de variáveis estatísticas para coletar os dados, esse período de espera é o tempo de aquecimento.

O quadro 1 descreve resumidamente a classificação de sistema, modelo e simulação.

Quadro 1 - Classificação resumida de sistema, modelo e simulação

<b>Sistema</b>	<b>Modelo</b>		<b>Simulação</b>
<b>Discreto:</b> Variáveis envolvidas assumem valores finitos ou infinitos numeráveis.	<b>Determinístico:</b> Variáveis assumem valores determinados.	<b>Estático:</b> Estuda o sistema sem levar em conta sua variabilidade com o tempo.	<b>Determinante:</b> Quando há interesse em se estudar o sistema em um dado intervalo de tempo.
<b>Contínuos:</b> Variáveis mudam constantemente com o tempo.	<b>Estocásticos:</b> Variáveis assumem valores diversos segundo uma determinada distribuição de probabilidades.	<b>Dinâmico:</b> Representa o sistema a qualquer tempo.	<b>Não determinante:</b> Quando há interesse em se estudar o sistema a partir de um determinado estado estável, podendo o estudo prolongar-se indefinidamente.

Fonte: Autor “adaptado de” Pereira, 2000, p. 13

Para a elaboração de um projeto de simulação, alguns passos são muito importantes, esses passos servem de guia e fornecem confiabilidade ao projeto além de reduzir o tempo de execução, entre outras facilidades. Na seção seguinte foram relatadas as principais metodologias para elaboração de projetos de simulação.

#### 2.4 ALGUMAS METODOLOGIAS PARA OS ESTUDOS DE SIMULAÇÃO

A simulação é um projeto que deve ser planejado com conhecimento das etapas e das necessidades ou objetivos, não se trata simplesmente de utilizar um *software*. Para isso deve-se conhecer muito bem o sistema e manter uma comunicação bem clara e objetiva com os usuários e pessoas envolvidas durante todo o processo.

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

A maioria dos trabalhos de simulação maus sucedidos tem como a principal causa a deficiência de um bom planejamento em seu estudo. Por isso realizar um estudo com a simulação requer muito mais do que o conhecimento de um *software* específico, requer também pessoas com conhecimento dos passos a serem seguidos, experiência analítica, estatística, organizacional e de engenharia (BRIGHENTI, 2006).

Segundo Pidd (1996), a elaboração de um modelo de simulação deve seguir alguns princípios práticos e básicos relevantes para uma simulação de sistemas, sendo eles pequenos ou grandes. Segundo o autor, a modelagem computacional de um sistema é uma tarefa que exige muito esforço por parte do moderador e que, quando elaborado com raciocínio cuidadoso e planejado, será bastante beneficiada. Para isso Pidd (1996), propõe cinco princípios básicos indispensáveis em qualquer metodologia para a implementação da simulação, os princípios em resumo são:

- a) o modelo pode ser simples apesar de partir de ideias ou pensamentos complicados. Os modelos não necessitam ser tão complicados quanto à realidade;
- b) ser parcimonioso, começando do simples e acrescentando complexidade na medida do necessário;
- c) evitar grandes modelos pela dificuldade em entendê-los. A regra é dividir os grandes modelos;
- d) o modelador não deve se apaixonar pelos dados. A definição dos dados a serem coletados deve ser orientada pelo modelo;
- e) o comportamento do modelador na construção do modelo seria como se estivesse desembaraçando-se dos problemas, pois a modelagem de forma alguma é um processo desordenado.

Para Lobão e Porto (1997), é muito importante se ter garantia de qualidade e consistência nos resultados de um estudo de simulação e que isto somente pode ser alcançado por meio de um estudo de simulação bem fundamentado e bem executado, que possa então garantir a consistência tanto dos dados manipulados como do modelo construído. Para isso os autores propõem uma metodologia de dez etapas para a elaboração de estudos de simulação, as etapas propostas são:

- a) definição do problema e dos objetivos do estudo; nesta etapa devem ser realizadas algumas questões para entender o funcionamento do sistema que será estudado bem como definir as limitações da simulação.

- b) elaboração de um esboço do modelo; nesta fase devem ser realizados os primeiros estudos sobre o fluxo de informações, a disposição física dos equipamentos, como os dados serão coletados e tabulados, entre outros.
- c) aquisição dos dados; os dados podem ser obtidos de históricos armazenados pela empresa, medições no próprio local, catálogos de fabricantes, entrevistas com operadores, projetistas dos equipamentos e outras formas.
- d) validação dos dados; as principais maneiras de validar os dados são coletar dados de diferentes fontes e verificar se os dados são semelhantes, construir um histograma e comparar com os tipos de distribuição mais adequados e rodar a simulação e comparar os resultados com os do sistema real.
- e) construção de um modelo para realização do estudo de simulação; nesta fase deve ser escolhido o software simulador.
- f) validação do modelo; a validação pode ser realizada comparando os resultados com os do sistema real, pelo teste de “*turing*” que é a discussão entre especialistas sobre os dados fornecidos pelo simulador e pelo sistema real.
- g) planejamento do experimento; nesta fase devem ser definidas questões como, para quais cenários do sistema as replicações serão realizadas, sob quais condições cada simulação será realizada, qual a duração de cada simulação, quantas replicações, entre outras.
- h) executar o experimento e analisar os resultados; organizar os dados de entrada utilizados e saídas da simulação.
- i) refinar o projeto do experimento; caso os resultados não se mostrem satisfatórios deve-se repetir o planejamento do experimento, validação dos dados e modelo.
- j) análise final dos resultados e documentação do processo; nesta etapa com os resultados das simulações verifica-se a melhor alternativa, documenta e pode-se implementar a melhor opção encontrada.

Para Shannon (1998), os seguintes passos devem estar presentes em qualquer estudo de simulação, são eles:

- a) definição do problema;
- b) planejamento do projeto de simulação;
- c) definição do sistema;
- d) elaboração do modelo conceitual;
- e) projeto experimental preliminar;

- f) preparação dos dados de entrada;
- g) inserção do modelo no software;
- h) verificação e validação;
- i) projeto experimental final;
- j) experimentação;
- k) análise e interpretação dos resultados;
- l) implementação e documentação.

É importante que o modelador inexperiente demore o tempo que for preciso antes de iniciar a etapa sete, pois com isso mais rápido o modelo e o projeto serão executados, desde que não se gaste muito tempo nas etapas seguintes e que se tenha um *software* com alto rendimento e o mínimo de erro. Baseado nisto, o autor Shannon (1998) define a “Regra 40-20-40”. Esta regra estabelece que 40% do esforço e tempo em um projeto de simulação deve ser dedicado as etapas um a seis, 20% para a etapa sete e 40% para as etapas oito a doze.

Segundo ProModel User Guide (2002), embora os requisitos para cada passo possam variar de simulação para simulação, o procedimento básico é essencialmente o mesmo. O principal valor de se adotar este procedimento sistemático, ou outro procedimento qualquer, é para garantir que o projeto seja realizado de forma organizada, com o mínimo de desperdício de recursos, tempo e máxima eficácia no alcance dos objetivos. Os seis passos básicos para conduzir um projeto de simulação são:

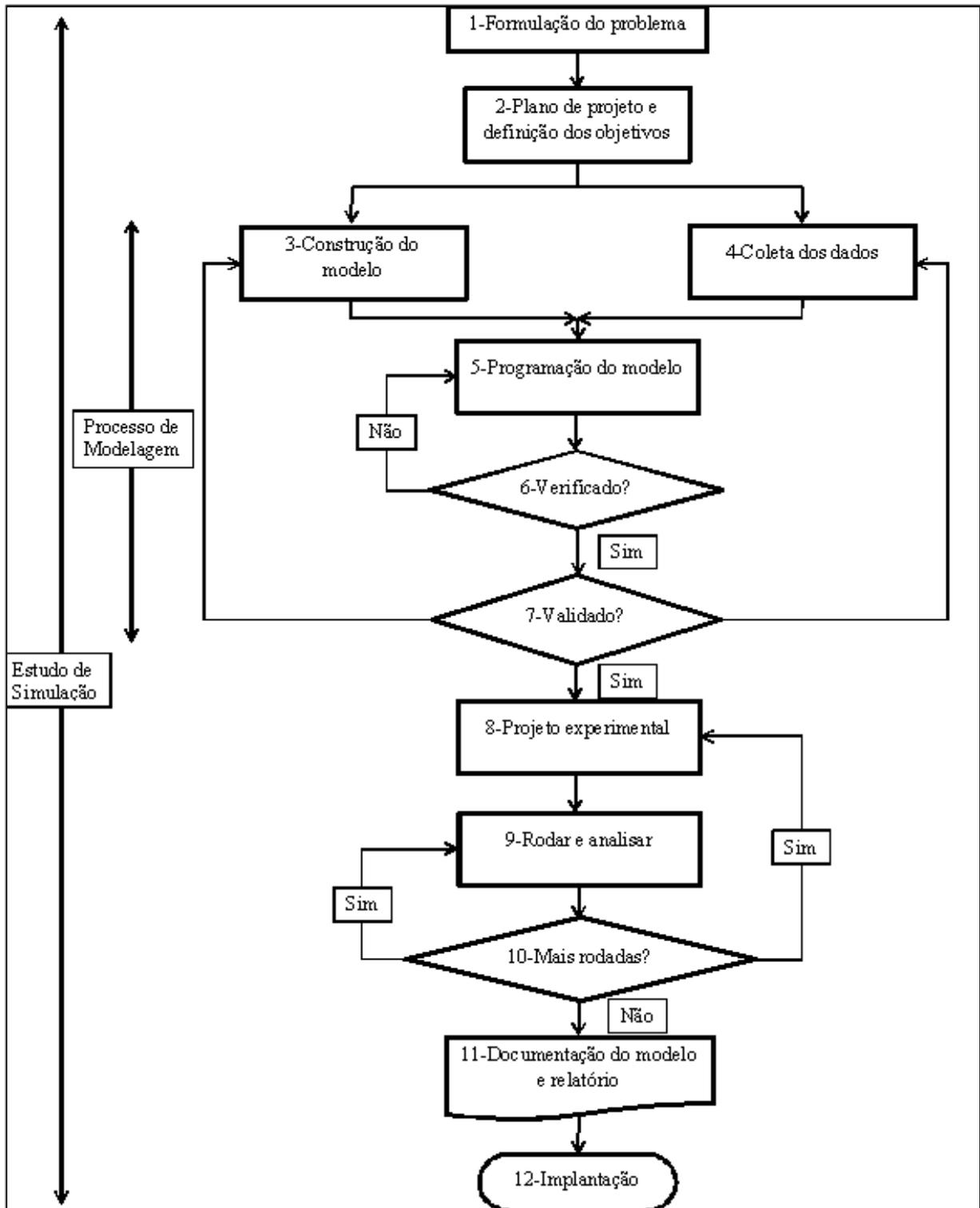
- a) plano de estudo; realizar um planejamento para a elaboração da simulação, nesta etapa são definidos: os objetivos, ferramentas, restrições principalmente quanto ao tempo e custo, especificações da simulação, nível de detalhe e grau de acuracidade, número de repetições, forma de demonstrar os resultados finais, custos e cronograma;
- b) definição do sistema; trata-se da identificação do modelo conceitual na qual a simulação será baseada. É realizada a coleta dos dados, e para ajudar o processo de junção e análise desses dados para definição do sistema os seguintes passos são indicados: definição dos dados requeridos, fonte apropriada dos dados, fazer certas considerações quando for necessário, converter os dados apropriadamente e documentar e aprovar os dados;
- c) construção do modelo; nesta etapa o objetivo é prover uma apresentação válida do sistema definido. Alguns passos dessa etapa são: realizar refinamento dos dados, expansão do sistema, verificação e validação do modelo;

- d) condução do experimento; baseado no resultado da simulação o modelador tem uma resposta sobre a validade de suas hipóteses, inseridas no sistema. Em um experimento de simulação há a entrada de variáveis definindo o modelo, tais variáveis são independentes e podem ser manipuladas. O efeito dessa manipulação é então medido e correlacionado. Embora o software ajude nessa etapa, cabe ao modelador tomar decisões do tipo: número de replicações do teste, o tamanho e complexidade da simulação, entre outras decisões;
- e) análise dos resultados; nesta etapa é realizada a análise dos resultados, que devem ser feitas com muita cautela;
- f) recomendando os resultados; com a análise dos resultados é possível realizar recomendações no sistema atual baseado nos resultados da simulação e que devem ser aproveitados para a tomada de decisão final.

Na literatura foram identificadas várias metodologias para um estudo de modelagem e simulação e todas muito próximas uma da outra, mas a metodologia que melhor se adequou ao estudo foi à proposta por Banks (1999), que divide nas 12 etapas a seguir, e mostradas na figura 10.

- Etapa 1 – Formulação do problema;
- Etapa 2 – Plano de projeto e definição dos objetivos;
- Etapa 3 – Conceituação do modelo;
- Etapa 4 – Coleta de dados (pode ocorrer simultaneamente à etapa 3);
- Etapa 5 – Programação do modelo;
- Etapa 6 – Verificação;
- Etapa 7 – Validação;
- Etapa 8 – Projeto experimental;
- Etapa 9 – Rodar e analisar;
- Etapa 10 – Verificar a necessidade de mais rodadas;
- Etapa 11 – Documentação do modelo e relatório;
- Etapa 12 – Implantação de mudanças no sistema estudado.

Figura 10 - Etapas para o estudo de modelagem e simulação



Fonte: Autor "Adaptado de" Banks, 1999, p. 12

## 2.5 SOFTWARES DE SIMULAÇÃO

As ferramentas de simulação desenvolvidas por engenheiros e projetistas para estudo dos mais diversos sistemas apresentam uma evolução diretamente ligada com a tecnologia de suporte (*hardware* e *software*) disponíveis no momento de sua implantação, tendo evoluído desde os seus modelos físicos em escala e os modelos matemáticos até a última geração de simuladores inteligentes e interativos com a interface gráfica (LOBÃO; PORTO, 1999).

Segundo Prado (1999 apud Vieira, 2006), dentre as inúmeras maneiras de se simular sistemas, deve-se considerar fortemente os recursos, há muito tempo utilizados, como a teoria das filas, desenvolvida por A. K. Erlang no início do século XX, que alcançou grande sucesso, apesar da sua complexidade matemática.

Ainda segundo Vieira (2006), pode-se utilizar também planilhas do MS Excel e o @RISC da *Paradise Corporation*.

No âmbito da simulação, o uso de *softwares* é um ponto crucial. Pode-se dizer que simulação é sinônimo de simulação computacional.

Apresenta-se no quadro 2, a evolução dos sistemas de simulação em paralelo com o desenvolvimento da tecnologia de suporte.

Quadro 2 - Evolução dos sistemas de simulação

<b>Classificação</b>	<b>Tecnologia disponível</b>	<b>Ferramentas de simulação</b>
Tipo I Até a década de 60	Conhecimentos científicos, matemáticos, estatísticos e habilidades manuais.	Modelos matemáticos, e modelos físicos em escala reduzida ou amplificada.
Tipo II Décadas de 60 e 70	Computadores de grande porte, primeiros microcomputadores.	Linguagem genérica: Fortran, Pascal e C. Linguagem de simulação: GPSS, SLAM, SIMAN e etc.
Tipo III Década de 80	Microcomputadores.	Pacotes de simulação: simuladores de interfase gráfica, tais como: ARENA, AUTOMOD, PROMODEL, MICRO SAINT e etc.
Tipo IV Década de 90	Estações de trabalho, microcomputadores de alto desempenho e grande capacidade de memória.	Simuladores de interface gráfica, interativos e inteligentes.

Fonte: Autor “adaptado de” Lobão e Porto, 1999, p. 14

Os *softwares* de simulação podem ser basicamente agrupados em duas grandes categorias, que são: linguagem de simulação e simuladores (LAW; KELTON, 1991 apud SAKURADA; MIYAKE, 2009).

As linguagens de simulação são “pacotes” computacionais de natureza genérica, porém com características especiais para determinados tipos de aplicações da simulação. Uma das principais vantagens das linguagens de simulação é que oferecem suficiente abertura para gerar modelos de simulação para os mais variados tipos de sistema. Já as desvantagens estão associadas à necessidade de conhecimentos bastante específicos de programação para a construção de modelos mais complexos (SAKURADA; MIYAKE, 2009).

Já os simuladores oferecem vantagens como requerimento de tempo relativamente menor para a construção do modelo e maior facilidade de utilização apoiada em menus e gráficos amigáveis. Os simuladores oferecem desvantagens como menor flexibilidade para

representar detalhes do sistema real e restrições para controlar a realização de experimentos sob condições muito específicas (SAKURADA; MIYAKE, 2009).

No passado havia poucas alternativas em termos de linguagem de simulação, como FORTRAN, Pascal, também eram poucas as alternativas de linguagem específicas para simulação entre elas, pode-se citar: GPSS, SIMULA, GASP e SLAM. Atualmente, entre as inúmeras opções, a dificuldade da escolha está no custo. Dentre as opções disponíveis pode-se citar: ARENA (*Rockwell Software Automation Inc.*), AutoMod (*Autosimulation*), Extend (*Imagine That*), GPSS H (*Wolverine*), Micro Saint (*Micro Analysis & Design*), ProModel (*ProModel Corporation*), SIMPLE++ (AESOP), Simscript II.5 e MODSIM III (*CACI Products Company*), TAYLOR Lib, VisSim (*Visual Solution*), entre outros (VIEIRA, 2006).

Segundo Granados, Hernández e Lyons (2014), a maioria dos pacotes de simulação permite que o modelo seja construído como uma representação de animação, que irá mostrar como os movimentos dos elementos são realmente implantados. Além disso, o modelo pode ser construído em várias etapas, alterado em qualquer um dos passos e testado durante a modificação de uma das variáveis.

Segundo Granado, Hernández e Lyons (2014), os pacotes de simulação mais comuns são: Arena, ProModel, Witness e Automod.

O ProModel é um simulador cujas aplicações se desenvolveram inicialmente na simulação de sistemas de manufatura, mas sua flexibilidade de programação permitiu estender sua aplicação a outros tipos de sistema de operação, tais como, cadeias de suprimento, organizações administrativas e sistemas de serviço na área de saúde (SAKURADA; MIYAKE, 2009).

## 2.6 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL UTILIZADO

Entre os *softwares* de simulação computacional descritos na seção anterior, o escolhido para o desenvolvimento desta pesquisa foi o ProModel.

Segundo Bergue (2000) algumas outras vantagens do ProModel são: possuir construtor lógico, rastreamento de eventos, a interface gráfica, a flexibilidade de modelagem e a importação e exportação de arquivos de planilhas eletrônicas.

Além disso, segundo Sakurada e Miyake (2009), o ProModel oferece funcionalidades que facilitam, por exemplo, a programação por meio de uma interface simples, o controle do avanço do tempo simulado com noção de calendário e turnos de trabalho e a realização de análises estatísticas.

O ProModel é uma poderosa ferramenta de simulação de fácil utilização e aplicável a todos os tipos de sistemas e processos, é uma ferramenta utilizada para modelar desde pequenos sistemas de manufatura até grandes e complexos sistemas, bem como a simulação de cadeias de suprimento (HARREL; PRICE, 2002).

Segundo Rivero (2004), o ProModel é um *software* de simulação com animação, especialmente elaborado para modelar processos produtivos e logísticos. O *software* permite algumas opções, tais como: análise de custos, avaliar diferentes cenários, gerar quantas repetições forem necessárias, a escolha automática de melhores alternativas de distribuição de dados, além de emitir relatórios e gráficos com o resumo dos resultados.

O *software* ProModel apresenta a facilidade de auxiliar na criação do modelo, para isso o ele apresenta alguns elementos básicos que precisam ser definidos (HARREL; PRICE, 2002). Os elementos básicos:

- a) locais (*locations*); são elementos que representam lugares físicos e fixos no sistema onde ocorrem os processos. Os locais pode ser uma máquina, uma mesa, um posto de trabalho, uma estrutura de armazenagem entre outros;
- b) entidades (*entities*); são os elementos que se “movem” e sofrem processamento no modelo. Por exemplo, os produtos, as pessoas, os documentos e as ordens de pedido;
- c) redes de caminho (*path networks*); define o caminho a ser percorrido pelos recursos ou entidades durante a movimentação ao longo do modelo;
- d) recursos (*resources*); são elementos de apoio da execução do processo ou de movimentação, por exemplo, um operador, uma ferramenta, um veículo, uma empilhadeira, entre outros;
- e) processo (*processing*); define as operações realizadas sobre a entidade e a movimentação das entidades pelos diferentes locais;
- f) chegadas (*arrivals*); determina as regras de chegada das entidades no sistema ou a regra para que determinada entidade seja introduzida no modelo. As chegadas podem ocorrer baseadas no tempo ou alguma condição;
- g) turnos (*shifts*); representa a escala de trabalho dos recursos e locais;
- h) atributos (*attributes*); são informações adicionadas às entidades ou locais;
- i) variáveis (*variables*); são contadores que podem ser introduzidos ao longo do modelo para mostrar os seus desempenhos;
- j) matrizes (*arrays*); elemento que serve para armazenar os dados ou variáveis do modelo;

- k) macros (*macros*); é definida como uma expressão ou um conjunto de expressões que podem ser utilizadas várias vezes no modelo;
- l) sub-rotinas (*subroutines*); são blocos lógicos parametrizáveis que se repetem em vários pontos do modelo.

## 2.7 MAPEAMENTO DO PROCESSO

Um mapa de processo é usado para entender o negócio e melhorar o desempenho do seu processo (ANJARD, 1996).

Para se gerenciar um processo, segundo Mello e Salgado (2005), é necessário, primeiramente visualizá-lo. O mapeamento é realizado pela utilização de uma técnica que representa as diversas tarefas necessárias, na sequência em que elas ocorrem, para a realização e entrega de um produto ou serviço.

Segundo Tseng, Qin Hai e Su (1999), o mapeamento do processo é representado por uma combinação de gráficos e textos que permite expor os detalhes do processo de forma gradual e controlada, descrever os processos com precisão, focar a atenção nas interfaces do mapa do processo e fornecer uma análise de processos consistente com o vocabulário do projeto.

Quanto às técnicas de mapeamento, a literatura apresenta inúmeros tipos com diferentes enfoques (OLIVEIRA; MONTEVECHI; MARINS, 2007). Assim torna-se muito importante filtrar a técnica adequada para cada situação onde se necessita empregar o mapeamento de processos.

Conforme Leal, Pinho e Corrêa (2005), as principais técnicas de mapeamento de processos são: Fluxograma, Mapofluxograma, *Integrated Computer Aided Manufacturing Definition (IDEF)*, *Unified Modeling Language (UML)*, *Service Blueprint* e Mapa do serviço.

As técnicas de fluxograma do processo e mapofluxograma do processo, normalmente são utilizadas para um melhor planejamento da simulação e visualização do sistema estudado. Estas técnicas auxiliam o modelador a representar de forma mais real o sistema que será simulado (BRIGHENTI, 2006).

Para Barnes, (1986 apud Brighenti, 2006), o fluxograma é uma técnica para registrar o processo de uma maneira compacta e de fácil visualização e entendimento. Inicia-se com a entrada de matéria prima na fábrica ou célula e segue o caminho da fabricação do produto, passando pela operação de transformação, transporte e inspeção, até a sua saída como produto acabado.

A fim de padronizar a montagem do fluxograma de processos, em 1947 a *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) padronizou cinco símbolos (DUARTE, 2003). O quadro 3 representa os cinco símbolos e suas descrições.

Quadro 3 - Símbolos utilizados para representar um fluxo de processo

<b>Símbolos</b>	<b>Descrição</b>
○	OPERAÇÃO – Um círculo indica uma operação
➔	TRANSPORTE – Uma flecha indica um transporte
□	INSPEÇÃO – Um quadrado indica uma inspeção
D	ESPERA – A letra D indica uma espera
△	ARMAZENAMENTO – Um triângulo indica um armazenamento

Fonte: Autor “adaptado de” Duarte, 2003, p. 14

Ainda segundo Barnes, (1986 apud Brighenti, 2006), mapofluxograma é o fluxograma desenhado sobre a planta do edifício ou *layout* para visualizar-se melhor o processo.

Segundo Kumar e Phrommathed (2006), a combinação entre o mapeamento do processo e a simulação computacional é benéfica, principalmente, pois reduz o risco de ineficiência da operação de fabricação redesenhada.

## 2.8 FUNÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA

Neste tópico foi realizada uma rápida revisão bibliográfica sobre estatística focando nos principais tipos de distribuição de probabilidades e teste de aderência, tópicos necessários para o desenvolvimento do trabalho de simulação e interpretação dos resultados gerados pelo modelo computacional.

Para auxiliar na manipulação dos dados poderá ser utilizado um *software* de estatística, onde se pode destacar: Stat::Fit, Best-Fit e MINITAB.

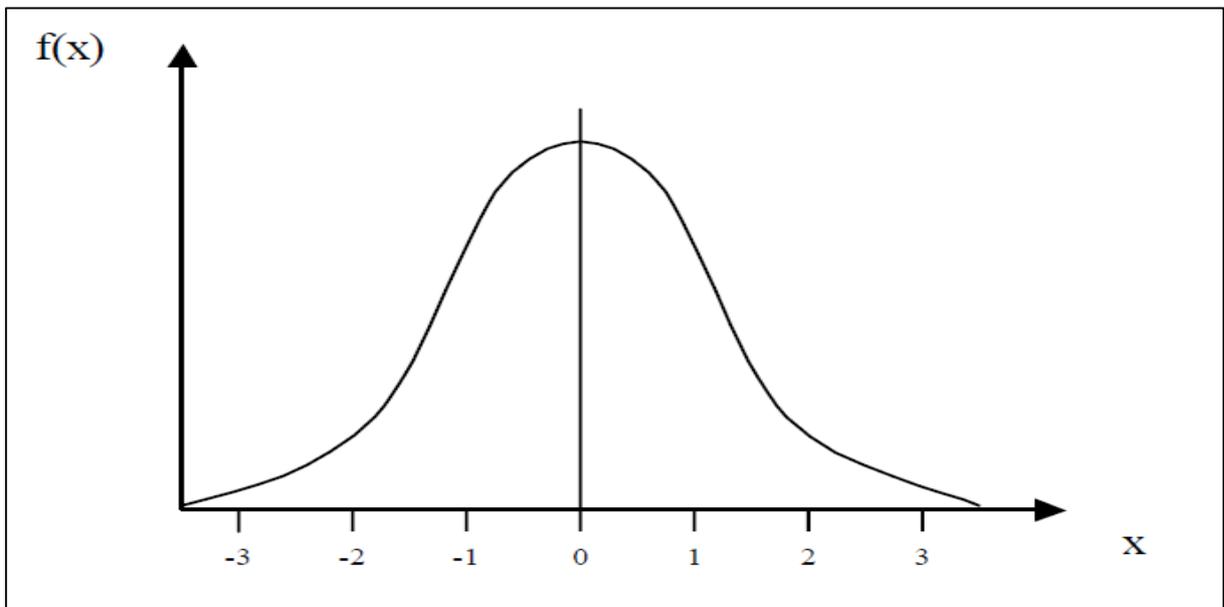
### 2.8.1 Distribuição normal

A distribuição normal é a mais importante das distribuições contínuas de probabilidade, é conhecida como a curva do sino, tem sua origem associada aos erros de mensuração (FARIAS; SOARES; CÉSAR, 2003).

Um exemplo na área de manufatura poderia ser as medidas coletadas nas inspeções de medição feita em uma peça após uma determinada operação, realizadas com o auxílio de relógios comparadores, paquímetros, micrômetros e etc.

A representação gráfica da distribuição normal é mostrada na figura 11. A equação é indicada na fórmula 1, a média pela fórmula 2 e o desvio padrão pela fórmula 3.

Figura 11 - Distribuição normal



Fonte: Autor.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-1/2[(x-\mu)/\sigma]^2} \quad (1)$$

Para  $-\infty < x < \infty$

Sendo:

$\mu$  = média da amostra;

$\sigma$  = desvio padrão;

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (2)$$

Para  $-\infty < \mu < \infty$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{n}} \quad (3)$$

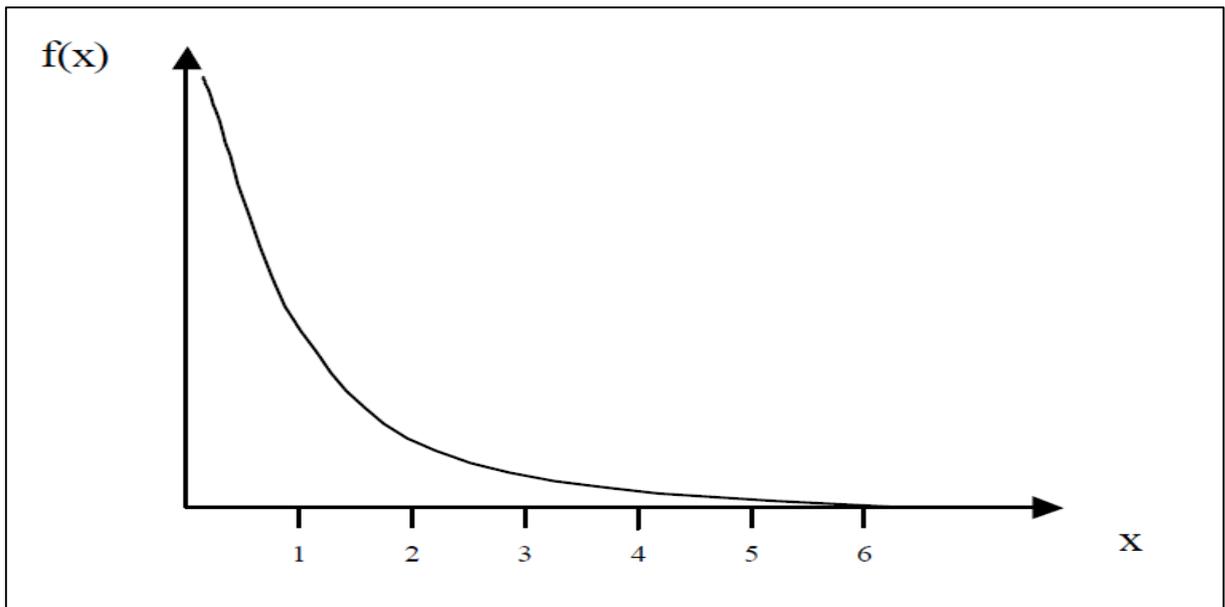
Para  $\mu > 0$

### 2.8.2 Distribuição exponencial

A distribuição exponencial é um modelo probabilístico para situações tais como o tempo de espera em uma fila, tempo de sobrevivência de um grupo de pacientes após o início de um tratamento e tempo de vida de peças ou materiais eletrônicos (FARIAS; SOARES; CÉSAR, 2003). Na área de manufatura podemos exemplificar com o intervalo de tempo entre a chegada das peças em uma determinada máquina, ou mesmo o tempo para se completar uma operação.

A forma da curva de uma distribuição exponencial está representada na figura 12. Ela também corresponde a um caso particular da distribuição de Weibull. Sua função de densidade de probabilidade é representada pela fórmula 4, a média pela fórmula 5 e variância da distribuição exponencial pela fórmula 6 e sua função de distribuição acumulada pela fórmula 7.

Figura 12 - Distribuição exponencial



Fonte: Autor.

$$f(x; \lambda) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (4)$$

Para  $x > 0$ ,  $\lambda > 0$  e 0 para outros valores.

Sendo:

$x$  = variável aleatória;

$\lambda$  = parâmetro de distribuição exponencial.

$$\mu = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

Sendo:

$\mu$  = média da amostra;

$\lambda$  = parâmetro de distribuição exponencial.

$$\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2} \quad (6)$$

Sendo:

$\sigma$  = variância da distribuição;

$\lambda$  = parâmetro de distribuição exponencial.

$$f(x; \lambda) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (7)$$

Para  $x \geq 0$  e 0 para outros valores.

Sendo:

$x$  = variável aleatória;

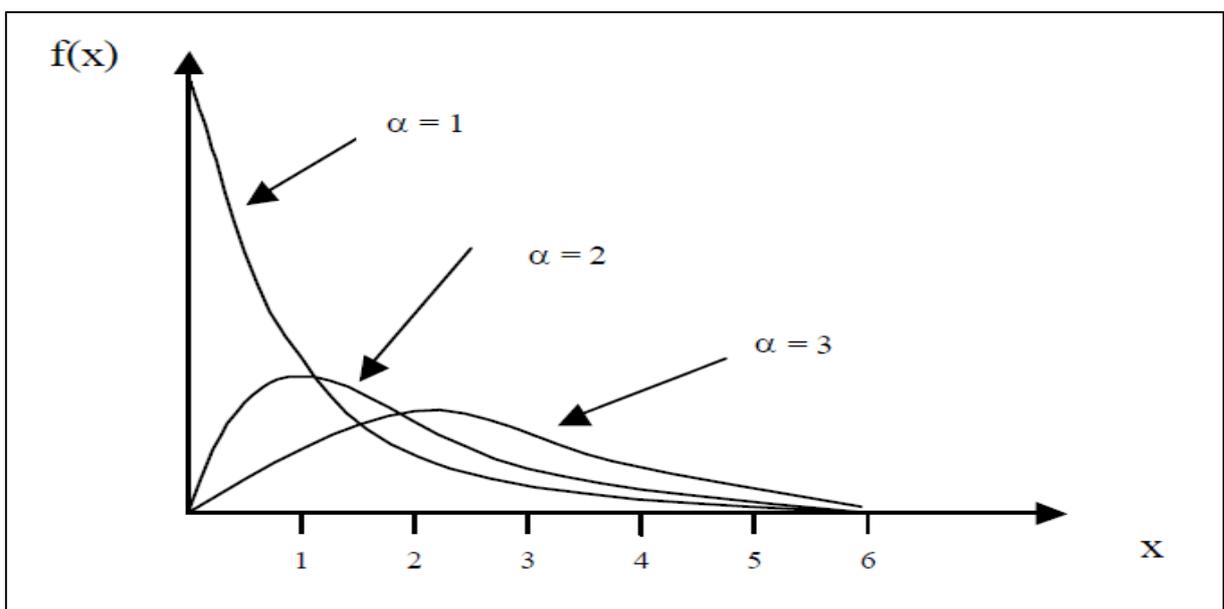
$\lambda$  = parâmetro de distribuição exponencial.

### 2.8.3 Distribuição gama

É uma distribuição contínua de probabilidade e bastante complexa, pode ser usada para representar o tempo para se completar uma determinada tarefa como, por exemplo, a construção de prédio, tempo de atendimento de um pedido, tempos de serviço ou tempo para se reparar uma máquina. Na área da manufatura poderia ser exemplificado como o tempo de troca de um dispositivo ou o tempo de troca de ferramentas (LAW; KELTON, 2000).

A forma da curva da distribuição gama é representada na figura 13. Sua função densidade de probabilidade é dada pela fórmula 8, a função gama é dada pela fórmula 9, a média da distribuição gama é dada pela fórmula 10, a variância é dada pela fórmula 11 e sua função distribuição acumulada é representada pela fórmula 12.

Figura 13 - Distribuição gama



Fonte: Autor.

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-x/\beta} \quad (8)$$

Para  $x \geq 0$  e 0 para os demais valores

Sendo:

$x$  = variável aleatória;

$\alpha$  = parâmetro de forma ( $\alpha > 0$ );

$\beta$  = parâmetro de escala ( $\beta > 0$ );

$\Gamma(\alpha)$  = função gama;

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{+\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (9)$$

Para  $\alpha > 0$

$$\mu = \alpha\beta \quad (10)$$

$$\sigma^2 = \alpha\beta^2 \quad (11)$$

$$F(x) = 1 - \sum_{k=0}^{\alpha-1} \frac{e^{-\beta x} (\beta x)^k}{k!} \quad (12)$$

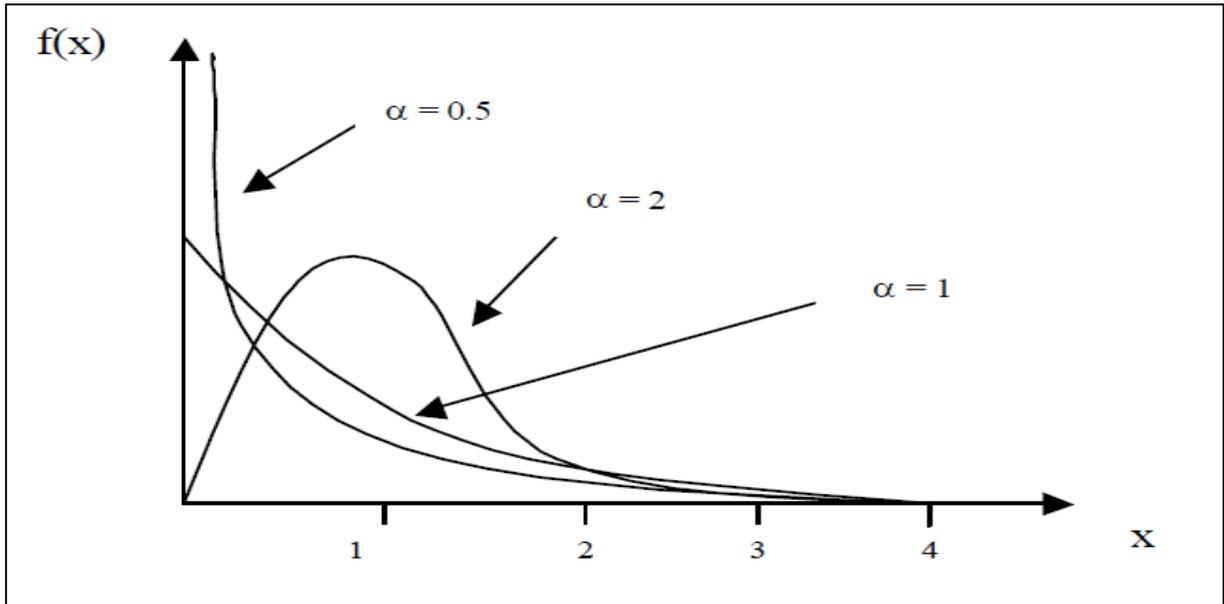
Para  $x > 0$  e  $F(x) = 0$  para  $x \leq 0$ .

#### 2.8.4 Distribuição de Weibull

É uma distribuição contínua de probabilidade que pode ser usada para se estimar o tempo de falha de uma peça ou o tempo para completar uma tarefa (FARIAS; SOARES; CÉSAR, 2003).

A forma da curva da distribuição de Weibull está representada na figura 14. A sua função densidade de probabilidade é dada pela fórmula 13, seus parâmetros pelas fórmulas 14 e 15, e sua função de distribuição acumulado dada pela fórmula 16.

Figura 14 - Distribuição de Weibull



Fonte: Autor.

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta^{\alpha-1}} x^{\alpha-1} e^{-(x/\beta)^{\alpha}} \quad (13)$$

Para  $x \geq 0$  e 0 para os demais valores

$$\mu = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (14)$$

$$\sigma^2 = \beta^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)^2 \right] \quad (15)$$

$$F(x) = 1 - e^{-(x/\beta)^{\alpha}} \quad (16)$$

Para  $x \geq 0$ , e 0 para os demais valores

### 2.8.5 Distribuição binomial

A distribuição binomial ou de Bernoulli é uma distribuição discreta de probabilidades que descreve a probabilidade de sucesso  $p$ , em  $n$  tentativas independentes (SPIEGEL, 1974).

Pode ser utilizada para se determinar a probabilidade de se encontrar um determinado número de peças defeituosas em um lote de produção de tamanho  $n$ , sabendo-se a

probabilidade de ocorrência de defeitos  $p$ . Sua função de probabilidades é dada pela fórmula 17, a média pela fórmula 18 e a variância pela fórmula 19.

$$f(x) = P(X = x) = \binom{n}{x} p^x (1 - p)^{n-x} = \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x (1 - p)^{n-x} \quad (17)$$

Para  $x = 0, 1, 2, \dots, n$

$$\mu = np \quad (18)$$

$$\sigma^2 = npq$$

(19)

### 2.8.6 Distribuição de Poisson

A distribuição de Poisson é uma distribuição discreta de probabilidades. Ocorre quando  $n \rightarrow \infty$  e  $p \rightarrow 0$ , mantendo-se constante  $\alpha = np$  na fórmula da distribuição binomial, com isto, esta se torna uma distribuição de Poisson (SPIEGEL, 1974). Sua função de probabilidades é dada pela fórmula 20, a média e a variância são iguais e representadas pela fórmula 21.

$$f(x) = P(X = x) = \frac{e^{-\alpha} \alpha^x}{x!} \quad (20)$$

Para  $x = 1, 2, 3 \dots$

$$\mu = \sigma^2 = \alpha \quad (21)$$

### 2.8.7 Testes de hipóteses

O objetivo do teste de hipóteses é fornecer um método que permita verificar se os dados amostrais trazem evidências que apoiam ou não uma hipótese formulada (FÁVERO et al., 2009).

Para Farias, Soares e César (2003), o objetivo do teste de hipóteses é decidir se uma conjectura sobre determinada característica de uma ou mais populações é, ou não, apoiada

pela evidência obtida dos dados amostrais. E tal conjectura é o que se chama de hipótese estatística, e a regra usada para decidir se ela é verdadeira ou não é o teste de hipótese.

Os testes de hipóteses podem ser de dois tipos, paramétricas ou não paramétricas, ou seja, os testes paramétricos são para testar hipóteses referentes a um parâmetro populacional ou à comparação de dois parâmetros, enquanto que os testes não paramétricos se referem a outros aspectos que não são os parâmetros em si, sendo: teste de aderência (qui-quadrado, método de Kolmogorov-Smirnov e verificação gráfica), teste de independência e comparação de duas populações (COSTA NETO, 1977). Por convenção  $H_0$  será a hipótese a ser testada e  $H_1$  a hipótese alternativa, ou seja, o teste irá aceitar  $H_0$  somente se negar  $H_1$  (COSTA NETO, 1977).

A revisão foi focada nos testes não paramétricos, mais precisamente nos testes de aderência devido à necessidade de análise dos dados a serem coletados para uso no modelo simulado.

#### 2.8.7.1 Teste de aderência

Nos testes de aderência admite-se por hipótese, que a distribuição da variável de interesse na população seja descrita por um determinado modelo de distribuição de probabilidades e se testa o modelo, ou seja, verifica-se a boa ou má aproximação dos dados da amostra ao modelo (COSTA NETO, 1977).

O primeiro teste de aderência é o chamado qui-quadrado ( $\chi^2$ ) desenvolvido por Karl Pearson, sua equação é mostrada na fórmula 22.

$$\chi_v^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} = \sum_{i=1}^k \frac{O_i^2}{E_i} - n \quad (22)$$

Sendo:

- a)  $\chi_v^2$  a estatística de teste, com v graus de liberdade;
- b)  $O_i$  a frequência observada para os dados de uma determinada classe;
- c)  $E_i$  a frequência esperada para os dados de uma determinada classe;
- d) k o número de classes;
- e) n o número de elementos da amostra.

A condição para que a distribuição de probabilidade dos dados que estão sendo analisada, ou seja, a hipótese  $H_0$  corresponda à distribuição de probabilidades teórica é que satisfaça a fórmula 23.

$$\chi_v^2 \leq \chi_{\alpha;v}^2 \quad (23)$$

Sendo:

- a)  $\alpha$  o nível de significância;
- b)  $v$  o número de graus de liberdade dado por:  $v = k - 1 - m$ , sendo  $m$  o número de parâmetros usados para calcular as frequências esperadas.

Uma das condições do teste é de que,  $E_i \geq 5$ , caso seja menor haverá a necessidade de se agrupar as classes adjacentes até que essa condição seja satisfeita. O cálculo das frequências esperadas é realizado através da fórmula 24.

$$E_i = np_i \quad (24)$$

Sendo:

- a)  $E_i$  a frequência esperada para os dados de uma determinada classe;
- b)  $n$  o número de elementos da amostra;
- c)  $p_i$  a probabilidade de ocorrência.

### 3 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada em uma empresa de pequeno porte, fundada no ano de 2000 e situada em Arujá – SP. A empresa atualmente possui uma área fabril de aproximadamente 6.000,0 m<sup>2</sup>, possui 70 colaboradores e um faturamento anual de aproximadamente 3,6 milhões de reais.

A empresa possui três tipos de produtos, o primeiro são as madeiras para diversos fins utilizados na construção civil, as principais espécies comercializadas são pinus, eucalipto e madeiras de lei. As madeiras são vendidas brutas ou aparelhadas dependendo da destinação e solicitação do cliente.

O segundo são os canteiros de obra para atender clientes que necessitam de locais provisórios para alojar a equipe que fará a administração da execução da obra, os canteiros de obra podem ser divididos em módulos, como escritórios, refeitórios, sanitários e vestiários, alojamentos e outros. Estes módulos podem ser construídos em um, dois ou três pavimentos.

O terceiro produto comercializado pela empresa são treliças de madeira para montagem de estruturas de telhados residenciais.

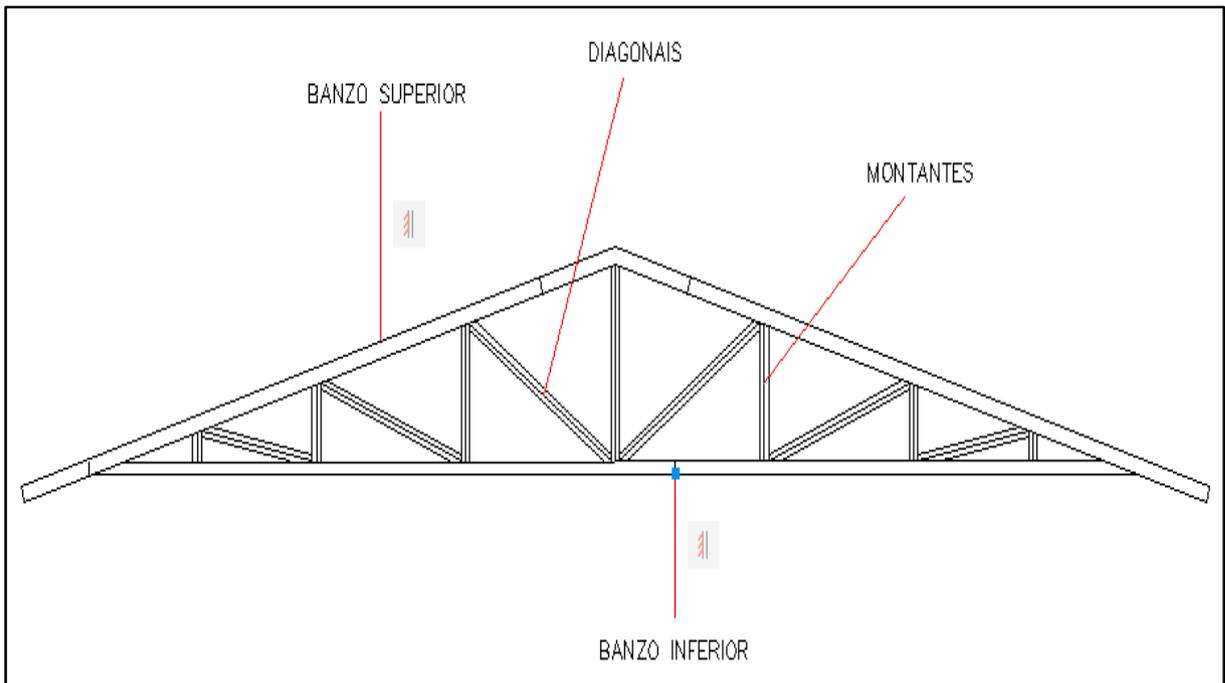
O sistema estudado nesta pesquisa foi o processo de fabricação de treliças de madeira que atende tanto os canteiros de obra quanto as estruturas de telhados residenciais. As treliças são dimensionadas de acordo com um projeto específico ou solicitação do cliente e são montadas na própria fábrica, posteriormente enviadas prontas para as obras que serão montadas nas edificações, a montagem na obra normalmente é realizada por técnicos da empresa ou pelo próprio cliente.

A decisão de realizar o estudo na linha de manufatura de treliças de madeira foi principalmente devido à falta de um estudo aprofundado e preciso sobre o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis e pelo fato da linha de produção atender a dois produtos manufaturados pela empresa (canteiros de obra e telhados residenciais).

As treliças podem ser produzidas com madeiras de pinus ou eucalipto. Foi considerada para realização desse trabalho a produção de treliças de eucalipto por apresentar maior deformação nas peças acabadas e, portanto, maior tempo de produção.

Na figura 15 é representado um modelo de uma treliça de madeira, objeto de estudo desta pesquisa.

Figura 15 – Modelo de treliça de madeira



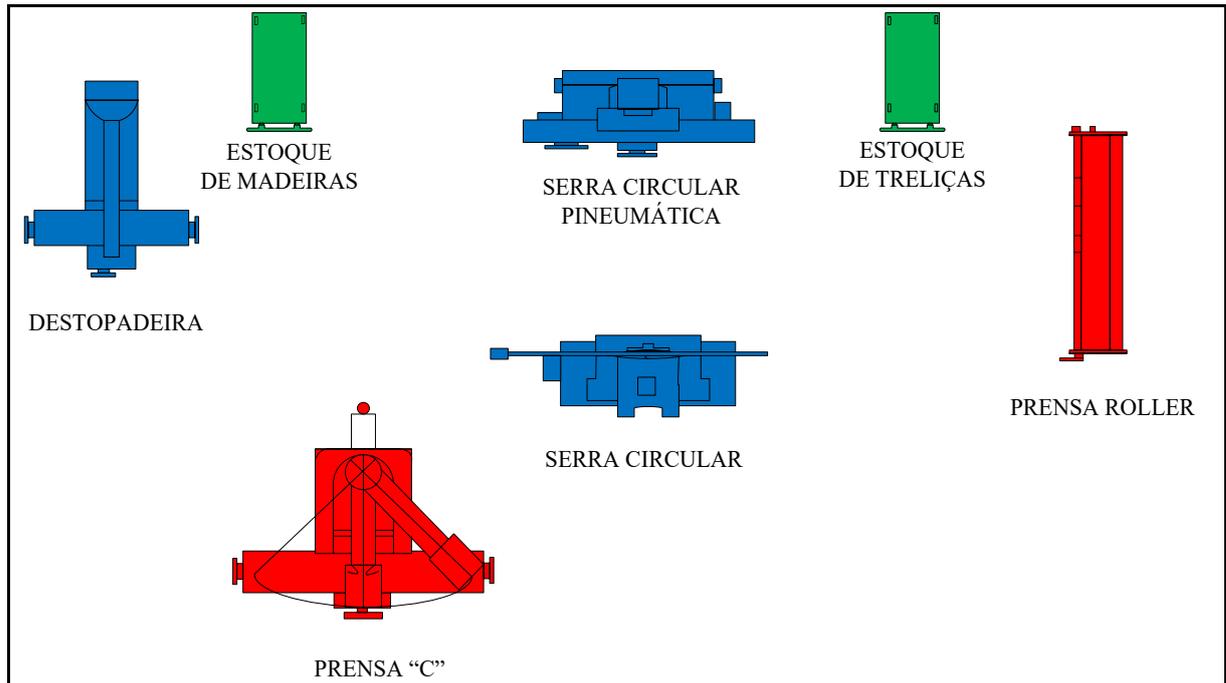
Fonte: Autor.

### 3.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

A empresa possui uma única linha de produção para atender ao setor de canteiros de obra e estruturas para telhados residenciais. Os elementos das treliças passam pelas mesmas máquinas e o que difere são as dimensões, tipo de madeira e formato das treliças (plana ou triangular).

O processo em estudo é composto por cinco máquinas como representado no *layout* atual do setor na figura 16, o setor opera com seis colaboradores e um turno de 8 horas de trabalho por dia.

Figura 16 - *Layout* da fábrica de treliças



Fonte: Autor.

As treliças de madeira possuem quatro elementos que apesar de serem produzidos na mesma linha passam por caminhos diferentes. Os quatro elementos que compõem uma treliça são: banzo superior, banzo inferior, montantes e diagonais.

O processo é abastecido por pacotes de madeiras disponibilizados no local denominado estoque de madeiras, que normalmente estão todas com as mesmas medidas de largura, espessura e comprimento.

A destopadeira é uma serra circular que realiza cortes retos no topo das madeiras, nesse equipamento as peças são cortadas nos tamanhos desejados.

A prensa "C" é uma prensa hidráulica que conecta os elementos de ligação a duas peças de madeira. Normalmente é utilizada para montagem dos banzos inferiores e superiores.

A serra circular é um equipamento que possui uma base giratória até 180°, muito utilizada no corte em grau dos montantes.

A serra circular pneumática é um equipamento desenvolvido pela empresa, ela possui duas serras que realizam dois cortes simultâneos na extremidade da madeira, esse equipamento é utilizado na produção das diagonais.

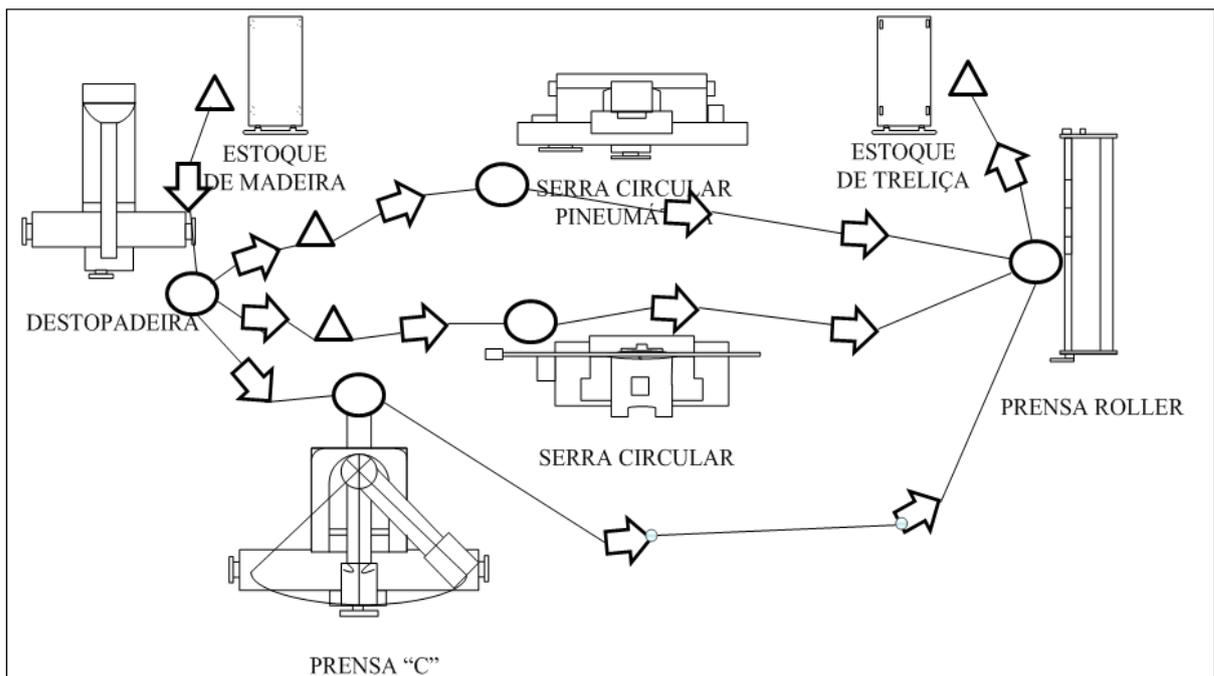
Por fim, a prensa *roller*, que se trata de uma mesa que possui dois rolos, um superior e outro inferior e que conecta os elementos de ligação aos nós da treliça, composta pelos quatro elementos.

Após montagem, as treliças são retiradas da prensa *roller* com a ajuda de uma talha e são armazenadas no local denominado estoque de treliças e aguardam até o carregamento.

### 3.2 ATIVIDADES E MAPOFLUXOGRAMA

Após a descrição do fluxo geral de processo, foram definidas as atividades de inspeção, operação, transporte, espera e armazenamento. Com estas informações foi possível montar o mapofluxograma do processo de manufatura de treliças de madeira, representado na figura 17.

Figura 17 - Mapofluxograma da linha de manufatura de treliças de madeira



Fonte: Autor.

### 3.3 TEMPOS E MAPA DO PROCESSO

O mapofluxograma fornece uma visão geral dos processos. Contudo é necessário um detalhamento maior para compreender o que ocorre em cada etapa da manufatura.

Para a linha de manufatura de treliças procurou-se mensurar todas as atividades através do tempo de realização. As informações do tempo de processamento de cada equipamento bem como seus tempos de *setup* foram obtidas através da cronometragem na linha de produção, visto que os equipamentos possuem operação manual e alguns foram desenvolvidos pela empresa, como é o caso da destopadeira e serra circular pneumática.

Já a quantidade de mão de obra e *layout* da linha de produção foi obtida com os encarregados e chefes do setor, ou mesmo analisados *in locu*.

As informações de tempo de movimentação de mão de obra, carrinho e talha manual, foram obtidos por cronometragem na atual linha de produção de treliças, por serem essas atividades usualmente utilizadas pela empresa.

Para a cronometragem dos tempos, primeiramente foi definido, o número necessário de ciclo de coleta para um grau de confiança de 95% que, de acordo com a tabela dos Z, dá um valor de 1,96 e uma previsão desejada de 10%, através da fórmula 25.

$$n = \left( \frac{100 \cdot z \cdot s}{a \cdot x} \right)^2 \quad (25)$$

Sendo:

- a) n, o número de amostras;
- b) z, o grau de confiança;
- c) s, o desvio padrão da amostra;
- d) a, a previsão desejada;
- e) x, a média da amostra.

Para isso foram tomados cinco tempos e calculada a sua média (x) e desvio padrão (s). A tabela 1 representa os cinco tempos iniciais coletados e os cálculos do número de amostra.

Para cada atividade foi calculado um número de amostras, porém para este estudo foi utilizado o número de ciclos apresentado pela atividade de maior coeficiente de variação (s/x), no caso igual a 27, foram coletadas 30 amostras, representados na tabela 14 no APÊNDICE A.

Tabela 1 - Amostras iniciais dos tempos de produção

<b>Tempos de produção - Setor de tesoura</b>					
<b>Descrição</b>	<b>Destopadeira (s)</b>	<b>Prensa C (s)</b>	<b>Serra circular (s)</b>	<b>Serra circular pneumática (s)</b>	<b>Prensa roller (min.)</b>
Amostra 1	10,0	62,0	6,0	8,0	14,0
Amostra 2	11,0	62,0	8,0	5,0	15,0
Amostra 3	10,0	63,0	7,0	6,0	17,0
Amostra 4	12,0	64,0	6,0	8,0	10,0
Amostra 5	13,0	60,0	6,0	6,0	12,0
Média	11,2	62,2	6,6	6,6	13,6
Desvio Padrão	1,53	2,08	0,58	1,15	3,61
S/X	0,136386181	0,033467299	0,087477314	0,174954627	0,26511406
N	7,145833333	0,43028229	2,939700031	11,75880012	27,00086505

Fonte: Autor.

Os tempos de processamento das máquinas entrarão no modelo na forma estocástica, portanto foi necessário realizar o levantamento da melhor distribuição teórica de probabilidades que melhor represente o comportamento do conjunto de tempos de cada máquina.

Para determinar curva de distribuição de probabilidades que melhor representa os tempos coletados de cada máquina, foi utilizado o *software* Stat::Fit do ProModel. No APÊNDICE B são apresentadas as análises das curvas de distribuição de probabilidades de cada máquina. Como os *p-values* encontrados nos seguintes testes de aderência (*Chi Square* e Kolmogorov-Smirnov) são maiores que o nível de significância adotado (0,05), concluiu-se que as distribuições apresentadas na tabela 2, são as expressões que melhor se adaptam aos dados coletados no sistema.

Tabela 2 - Distribuições de probabilidade

<b>Locais</b>	<b>Curvas de distribuição</b>	<b>Distribuições</b>
Destopadeira	Lognormal	-744+L(754, 1.82)
Prensa C	Pearson 5	35.7+P5(76.2, 1.9e+003)
Serra circular	Weibull	4.71+W(1.83, 2.34)
Serra circular pneumática	Erlang	-15.+ER(21.7, 280)
Prensa roller	Weibull	0.989+W(8.17, 13.7)

Fonte: Autor.

Nos quadros 4, 5 e 6 é representado o mapa do processo da linha de manufatura de cada elemento que compõe uma treliça e seus respectivos tempos médios de atividade.

Quadro 4 - Mapa do processo da linha de manufatura do banzo superior e inferior

<b>MAPA DO PROCESSO</b>		
<b>LOCAL:</b>	Linha de manufatura de banzos para treliças de madeira	
<b>DATA:</b>	07/04/2015	
<b>Tempo [s]</b>	<b>Símbolos</b>	<b>Descrição</b>
0,0	○ → □ ▮ ▲	Armazenar madeira no estoque
18,0	○ → □ ▮ ▲	Movimentar com operador as madeiras até a destopadeira
30,0	● → □ ▮ ▲	Cortar as madeiras para banzos
20,0	○ → □ ▮ ▲	Movimentar com operador os banzos até a prensa "C"
60,0	● → □ ▮ ▲	Emendar banzos
35,0	○ → □ ▮ ▲	Movimentar com operador os banzos até a prensa <i>roller</i>
80,0	● → □ ▮ ▲	Emendar banzos na treliça junto com outros elementos
100,0	○ → □ ▮ ▲	Movimentar com talha as treliças até o estoque
0,0	○ → □ ▮ ▲	Armazenar treliças no estoque
<b>383,0</b>		<b>TOTAL</b>

Fonte: Autor.

Quadro 5 - Mapa do processo da linha de manufatura dos montantes

<b>MAPA DO PROCESSO</b>		
<b>LOCAL:</b>	Linha de manufatura de montantes para treliças de madeira	
<b>DATA:</b>	07/04/2015	
<b>Tempo [s]</b>	<b>Símbolos</b>	<b>Descrição</b>
0,0	○ → □ ▮ ▲	Armazenar as madeiras no estoque
6,0	○ → □ ▮ ▲	Movimentar com operador as madeiras até a destopadeira
10,0	● → □ ▮ ▲	Cortar as madeiras para montantes
5,0	○ → □ ▮ ▲	Movimentar com operador os montantes até o palete um
5,0	○ → □ ▮ ▲	Armazenar montantes no palete um
5,0	○ → □ ▮ ▲	Movimentar com operador até a serra circular
6,0	● → □ ▮ ▲	Cortar em grau a ponta dos montantes
5,0	○ → □ ▮ ▲	Movimentar com operador os montantes até a prensa <i>roller</i>
35,0	● → □ ▮ ▲	Emendar montantes na treliça junto com outros elementos
43,0	○ → □ ▮ ▲	Movimentar com talha as treliças até o estoque
0,0	○ → □ ▮ ▲	Armazenar treliças no estoque
<b>120,0</b>		<b>TOTAL</b>

Fonte: Autor.

Quadro 6 - Mapa do processo da linha de manufatura das diagonais

MAPA DO PROCESSO		
<b>LOCAL:</b>	Linha de manufatura de diagonais para treliças de madeira	
<b>DATA:</b>	07/04/2015	
Tempo [s]	Símbolos	Descrição
0,0		Armazenar as madeiras no estoque
6,0		Movimentar com operador as madeiras até a destopadeira
10,0		Cortar as madeiras para diagonais
5,0		Movimentar com operador as diagonais até o palete dois
5,0		Armazenar diagonais no palete dois
5,0		Movimentar com operador até a serra circular pneumática
8,0		Cortar em grau a ponta das diagonais
5,0		Movimentar com operador as diagonais até a prensa <i>roller</i>
40,0		Emendar as diagonais na treliça junto com outros elementos
50,0		Movimentar com talha as treliças até o estoque
0,0		Armazenar treliças no estoque
<b>134,0</b>		<b>TOTAL</b>

Fonte: Autor.

As madeiras chegam brutas na empresa e são processadas em outro setor para ficarem com as medidas de largura e espessura adequadas para a montagem das treliças. As madeiras são disponibilizadas em pacotes no local denominado estoque de madeiras.

A primeira etapa do processo é o corte nas medidas adequadas, realizada pela destopadeira; um operador retira uma peça por vez do estoque de madeira, insere no equipamento, aciona e aguarda o corte, em seguida retira a peça que pode ser enviada para a prensa “C” para formar os banzos superiores e inferiores, pode ser designada para confecção dos montantes e ser transportada até a serra circular ou pode ser transformada em diagonais e ser transportada até a serra circular pneumática (ver figura 17).

A segunda etapa é dividida em três sequências: a primeira sequência pode ser a realização da emenda dos banzos superiores e inferiores, realizada por um operador, que após as peças serem deixadas na mesa da prensa “C” por outro operador, ajusta na prensa “C”, insere os elementos de ligação, aciona e aguarda a operação, retira as peças e transporta até a prensa *roller*. A prensa “C” realiza a operação em uma peça por vez (ver figura 17).

A segunda sequência pode ser os cortes das peças para gerar os montantes na serra circular; um operador movimenta as sete peças, armazenadas no palete um, até a serra circular, posiciona e aciona a serra para realizar os cortes; após o corte movimenta as peças manualmente até a prensa *roller*. A serra circular opera uma peça por vez. A terceira sequência trata-se da realização dos cortes das diagonais pela serra circular pneumática, um

operador movimentava as seis peças, armazenadas no palete dois, até a serra circular pneumática, posiciona e aciona a serra para realizar os cortes, após os cortes as peças são movimentadas até a prensa *roller*. A serra circular pneumática opera uma peça por vez.

As três sequências descritas acima, operam simultaneamente e utilizando os seis operadores aleatoriamente de acordo com a sua disponibilidade.

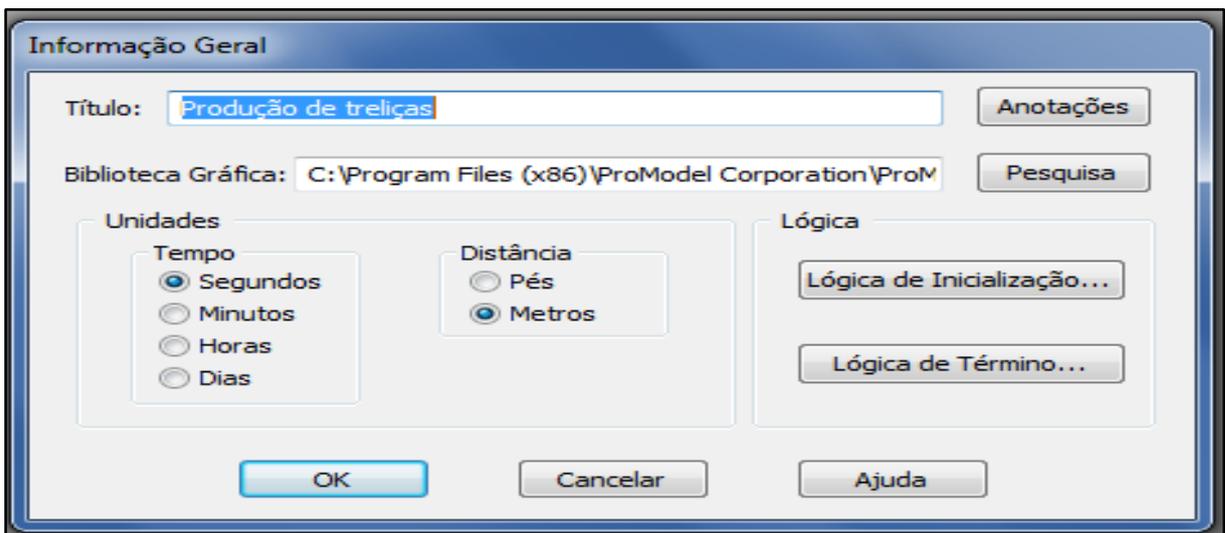
A terceira etapa do processo é a junção das peças produzidas e disponibilizadas na prensa *roller*; normalmente dois operadores organizam os elementos na mesa da prensa, posicionam os elementos de ligação e outro operador aciona a máquina e inicia o processo de prensagem. A treliça é retirada da mesa com uma talha manual e é armazenada no estoque de treliças.

### 3.4 CONSTRUÇÃO DO MODELO

Antes de realizar a simulação, um modelo do setor em estudo foi criado, seguindo as seguintes etapas:

Etapa 1 - foram definidas as informações gerais para montagem do modelo, que são; título do projeto, definido por produção de treliças, unidades de tempo e distâncias e biblioteca gráfica que contém a representação de máquinas e equipamentos que foram utilizadas para a representação da linha de produção em estudo. Na figura 18 é representada a inserção das informações gerais no *software* ProModel.

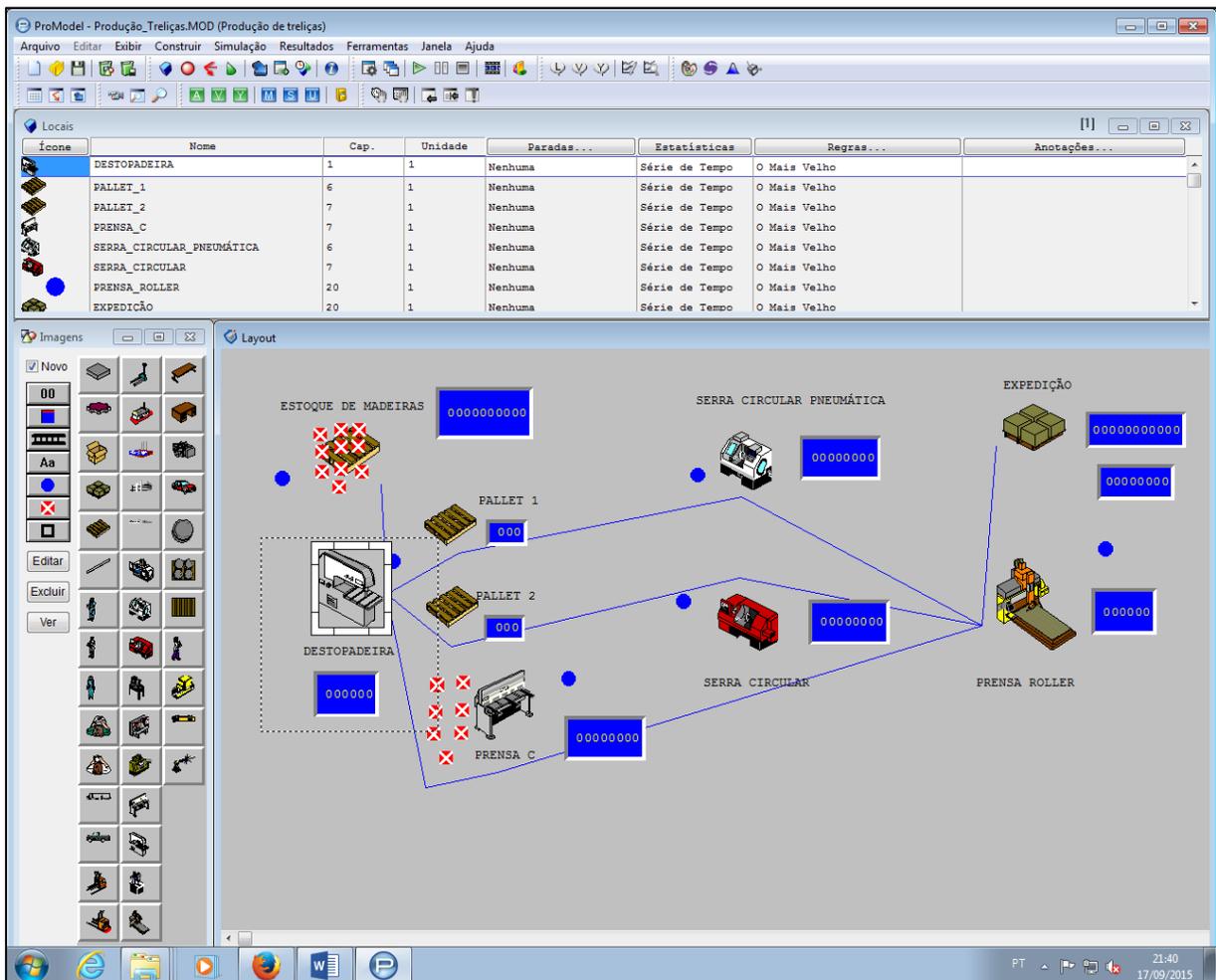
Figura 18 - Montagem do modelo – Definição das informações gerais



Fonte: *Software* ProModel, 2015

Etapa 2 - os locais definidos são: estoque de madeiras, destopadeira, paleta 1, paleta 2, prensa “C”, serra circular, serra circular pneumática, prensa *roller* e expedição. Na representação dos locais procurou-se adotar os mesmos nomes apresentados na figura 17, para que durante a simulação e análise dos resultados não houvesse confusão. A figura 19 representa a inserção dos locais no simulador.

Figura 19 - Montagem do modelo – Definição dos locais



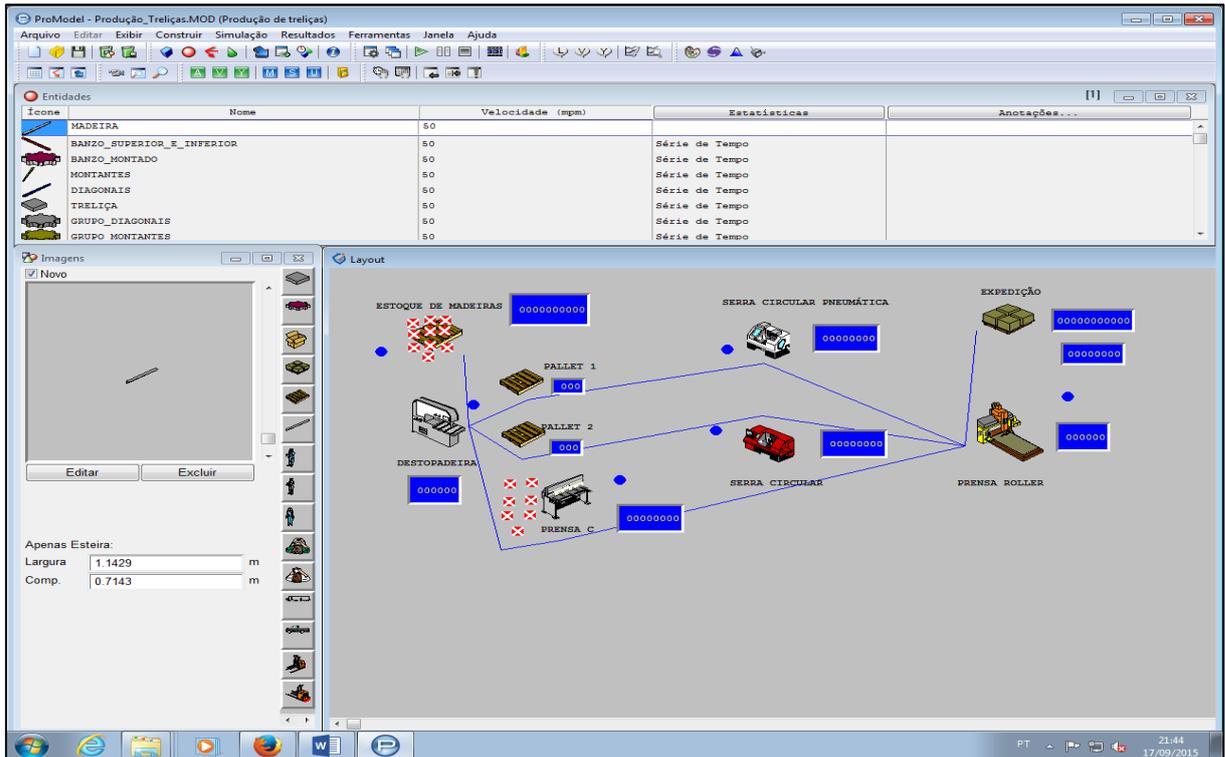
Fonte: Software ProModel, 2015

Etapa 3 – foram criadas as entidades, foram criadas as seguintes entidades: madeira, banzo superior e inferior, banzo montado, montantes, grupo montantes, diagonais, grupo diagonais e treliça. O *software* ProModel permite configurar algumas características como dimensão, cor, identificação, velocidade e outras. A figura 20 representa a configuração das entidades.

Etapa 4 - definição da rede de caminhos: Após definidos os locais e entidades, foram configuradas as redes de caminhos. Nesta etapa são definidas por onde as entidades transitam

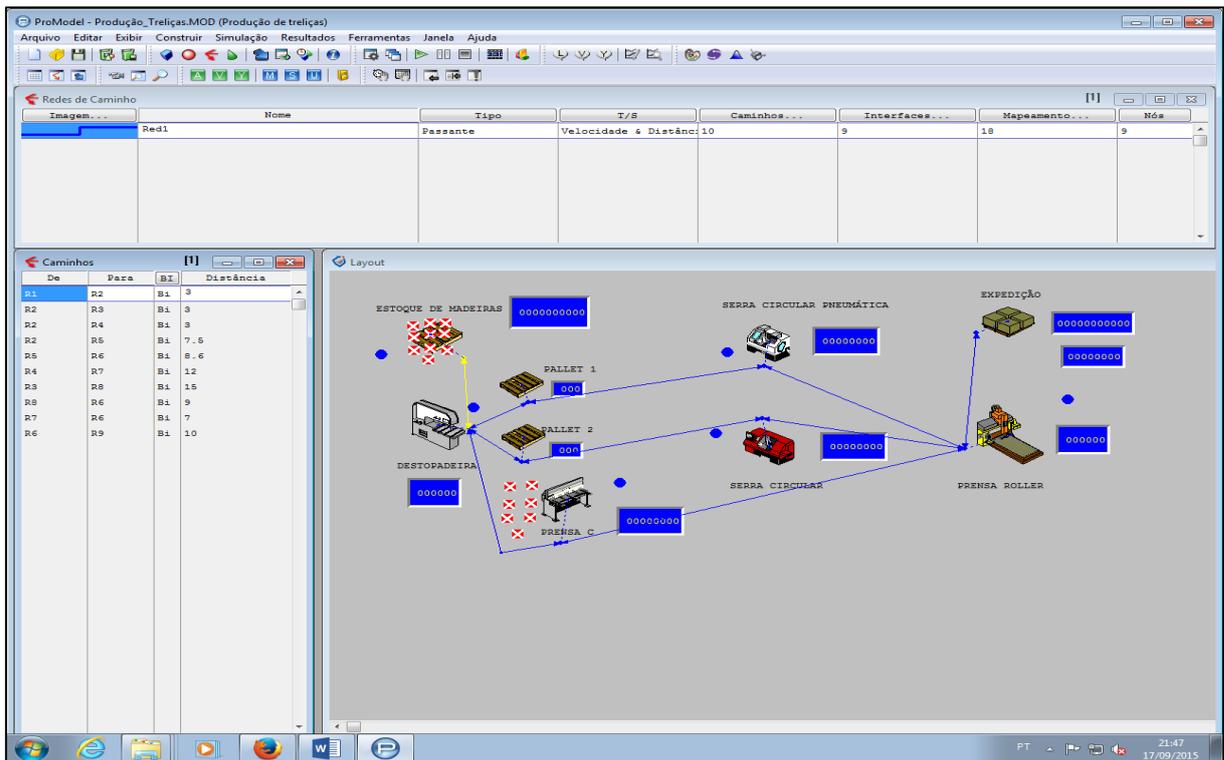
no processo, um fator importante no resultado final da simulação é a definição correta da distância percorrida pela entidade entre um posto de processamento e outro, por isso a distância no modelo deve ser descrita exatamente como está na planta da empresa em estudo. A figura 21 representa a configuração da rede de caminhos.

Figura 20 - Montagem do modelo – Definição das entidades



Fonte: Software ProModel, 2015

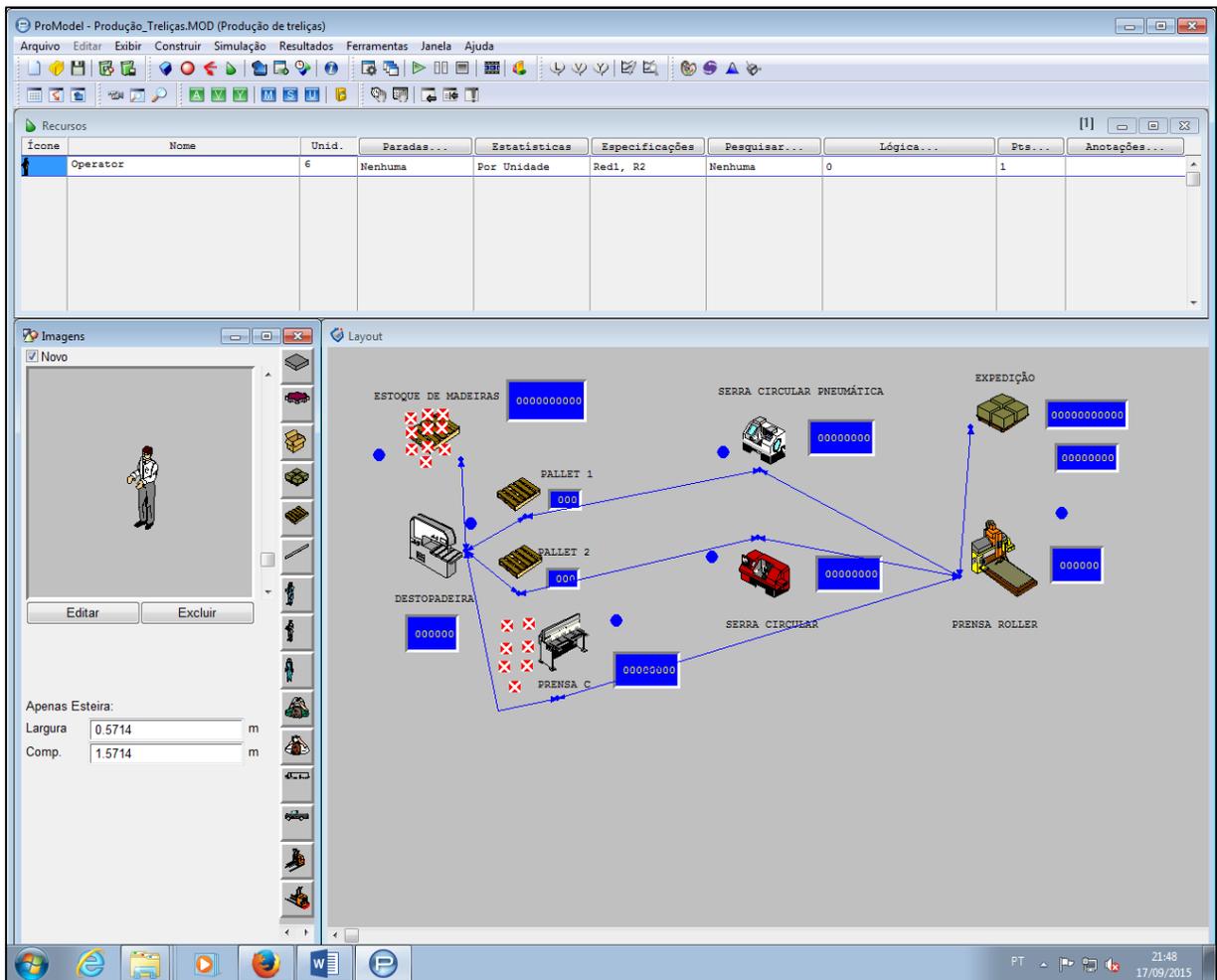
Figura 21 - Montagem do modelo – Definição da rede de caminhos



Fonte: *Software* ProModel, 2015

Etapa 5 - definição dos recursos: os recursos são elementos que movimentam as entidades de um lado para outro, neste estudo, os recursos são os seis operadores. Na figura 22 é representada a configuração dos recursos.

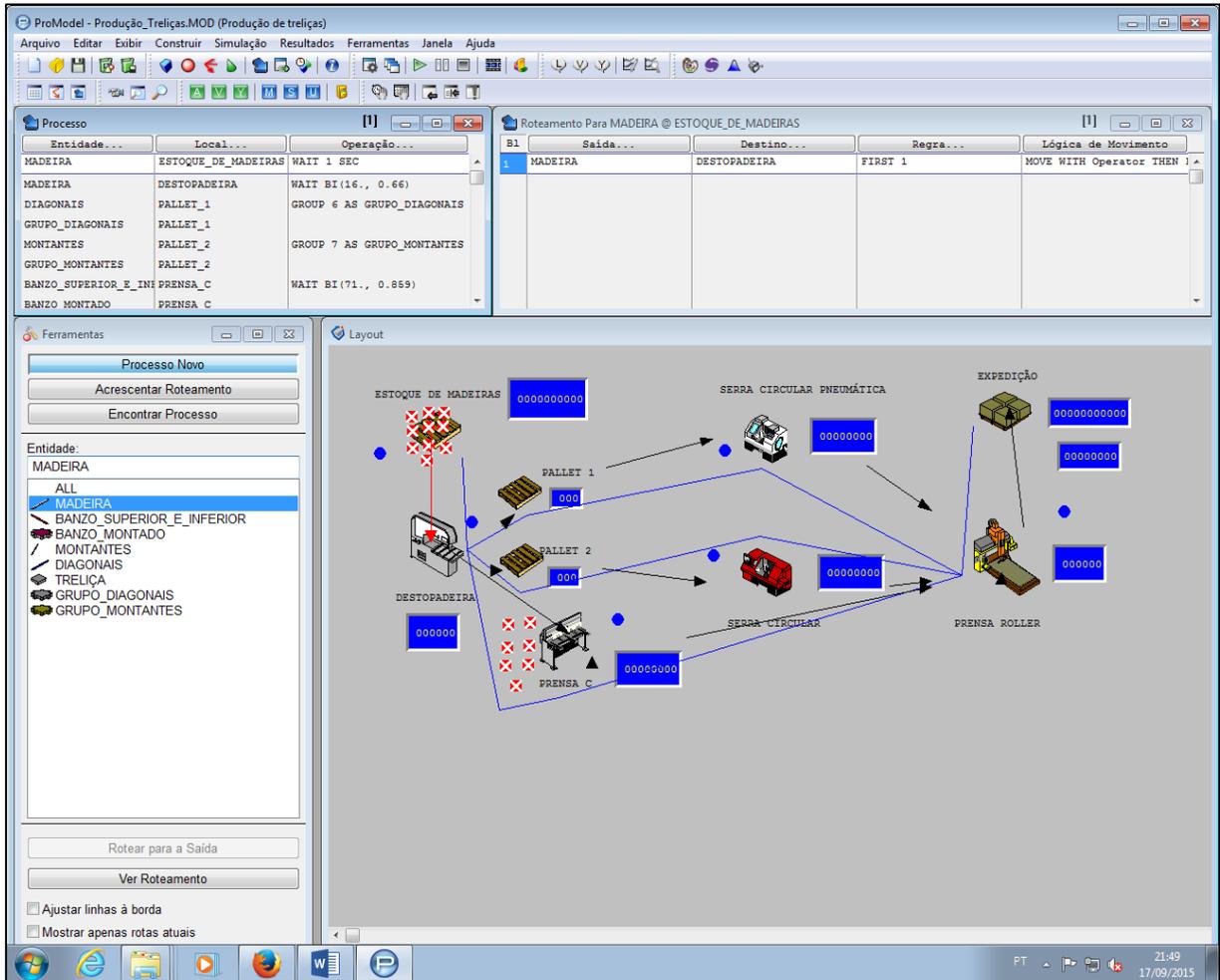
Figura 22 - Montagem do modelo – Definição dos recursos



Fonte: Software ProModel, 2015

Etapa 6 - definição dos processos: nesta etapa foram definidas as lógicas da simulação, ou seja, para cada entidade, foram definidos os locais e operação, escolhido qual recurso participará da operação, regra de roteamento, lógica de movimentação dentre outras configurações importantes para a simulação do processo. A figura 23 representa a configuração dos processos de produção de treliças.

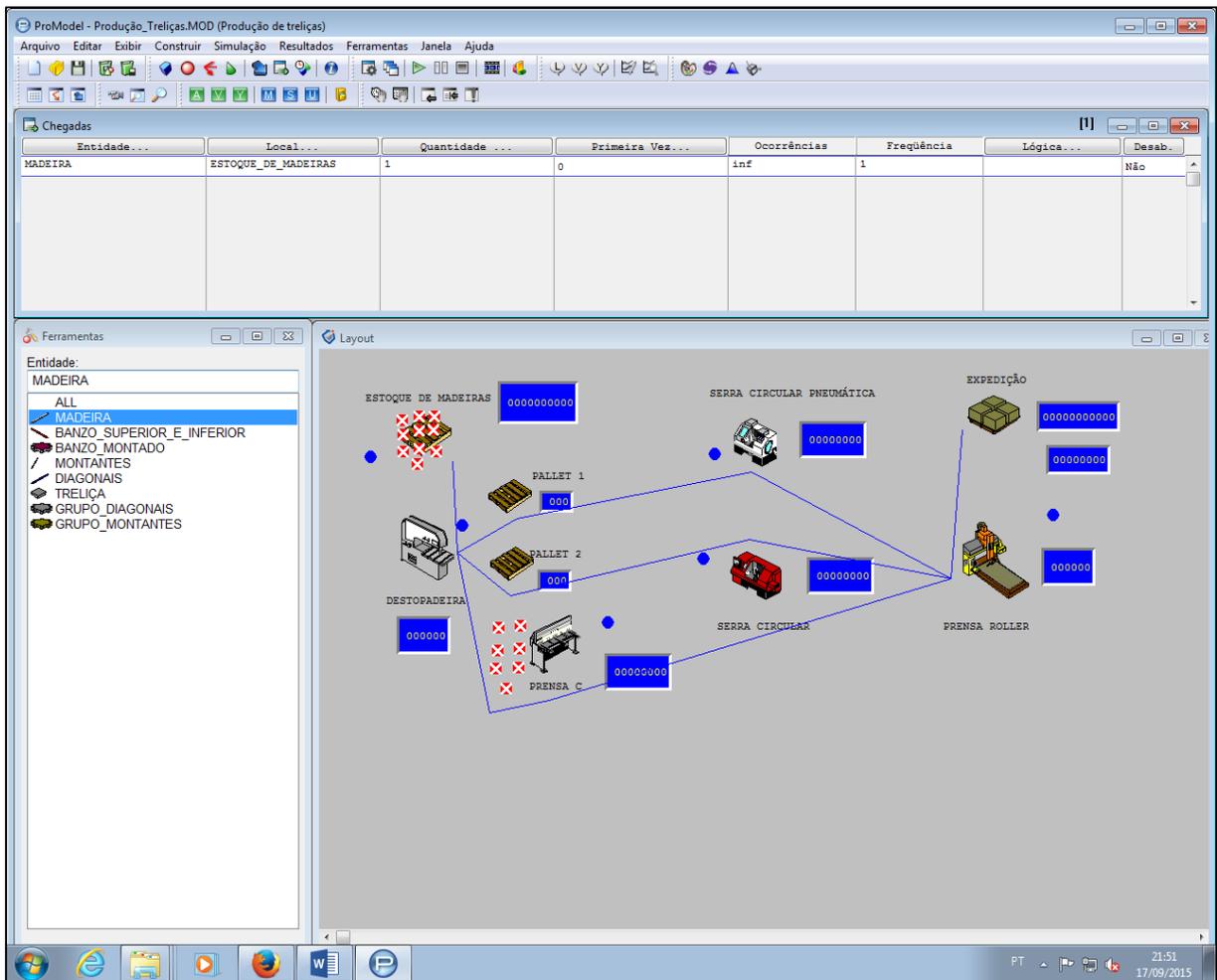
Figura 23 - Montagem do modelo - Definição dos processos



Fonte: Software ProModel, 2015

Etapa 7 - definição das chegadas: para que o modelo entre em operação é necessário definir alguns parâmetros de chegada. Foi definido que a entidade chegada seria a madeira, o local de chegada seria o estoque de madeiras, quantidade de peças além de outras configurações como primeira vez, ocorrência e frequência lógica. Na figura 24 são representadas as variáveis definidas para a chegada.

Figura 24 - Montagem do modelo - Definição das chegadas



Fonte: *Software ProModel*, 2015

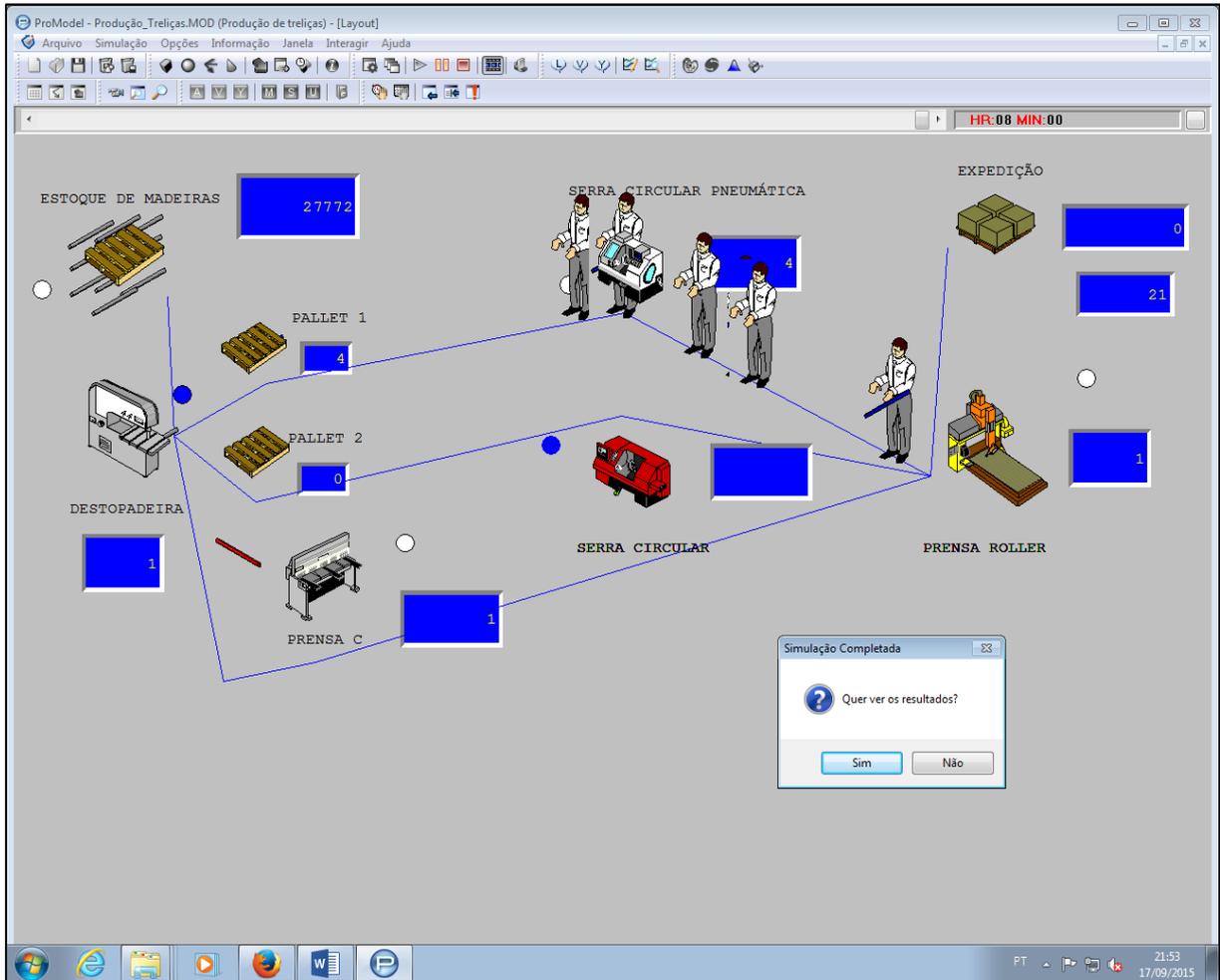
Etapa 8 - definição das variáveis globais: a princípio foi criada apenas uma variável que tem o objetivo de determinar a quantidade total de treliças produzidas por simulação.

Etapa 9 - definição dos turnos: uma das questões dessa pesquisa é justamente verificar o acréscimo de mais turnos de trabalho no setor, analisar se realmente ocorre aumento no volume de produção como esperam os gestores da empresa sem afetar outras variáveis, como a utilização dos equipamentos e recursos bem como gargalos na linha. A princípio foi definido um turno de oito horas de trabalho por dia e vinte dias por mês.

Além das configurações descritas para montagem do modelo no *software ProModel*, existem outras como, atributos, matrizes e sub-rotinas, porém neste estudo não houve a necessidade de utilizar tais recursos.

Na figura 25 é representado o modelo proposto do sistema em estudo em funcionamento no *software ProModel*, a partir deste modelo foram realizados os experimentos.

Figura 25 - Modelo de simulação do setor em estudo



Fonte: *Software* ProModel, 2015

O *software* ProModel permite a visualização de toda programação da simulação desenvolvida. Esta programação é mostrada no APÊNDICE C.

### 3.5 VALIDAÇÃO DO MODELO

Segundo Shannon (1998), a validação do modelo de simulação é extremamente importante, mesmo quando os modelos são criados copiando o máximo de detalhes possível, no final é muito importante validar o modelo, pois se pretende verificar se ele possui um nível aceitável de confiança para poder inferir respostas que serão usadas como apoio à tomada de decisão.

Diante disso, para a montagem do modelo proposto foram levantados todos os tempos, processos, *layout*, número de operadores e o modelo foi validado junto aos responsáveis da empresa e do setor em estudo.

Os dados de entrada utilizados na simulação da linha de manufatura em estudo foram os seguintes:

- a) o modelo foi simulado por um período de oito horas (um turno);
- b) a destopadeira, prensa “C”, serra circular, serra circular pneumática e prensa *roller* operam em um, dois ou três turnos;
- c) para o início do sistema foi considerado que não falta matéria prima (madeiras) no estoque de madeiras;
- d) existem na linha de produção seis operadores que atuam aleatoriamente nas operações;
- e) não existe na linha nenhum *buffet* e opera em lote unitário (uma treliça por vez).

Após a primeira simulação pode-se verificar que o número de treliças produzidas na simulação foi de 21 unidades, 5% maior do que a produção real do setor, como demonstrando na tabela 3. Diante da pequena diferença foi definido junto com os responsáveis da empresa que este seria o modelo que representaria a sistema de produção de treliças e utilizado para análise dos experimentos.

Tabela 3 - Comparação entre o volume de produção planejado / real e simulado

<b>Descrição</b>	<b>Planejado / Real</b>	<b>Simulado</b>	<b>% Variação</b>
Número de turnos	1	1	0
Número de operadores	6	6	0
Produção total	20	21	5

Fonte: Autor.

### 3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Diante do principal objetivo deste estudo que foi avaliar o volume de produção da linha de produção de treliças, foram propostos alguns experimentos com diferentes cenários para se discutir melhorias no sistema.

O primeiro experimento teve como objetivo verificar e identificar os gargalos na linha de produção em estudo, o percentual de utilização dos equipamentos e recursos do sistema real, pois a linha foi montada e na maioria das vezes foram tomadas decisões baseadas em um levantamento pouco preciso e considerando o sistema estático sem levar a condição dinâmica do sistema. Nesse cenário a simulação foi realizada considerando um turno de oito horas de trabalho por dia.

No segundo experimento foi verificado o comportamento do sistema considerando quatro cenários, o primeiro com três operadores, o segundo com seis, o terceiro com nove e o quarto cenário com doze operadores, ainda considerando um turno de oito horas de trabalho por dia. O número de operadores foi definido junto com a diretoria da empresa que validou no máximo o dobro da quantidade atual.

No terceiro experimento foram realizadas simulações para verificar o comportamento do volume de produção, utilização dos equipamentos e recursos diante do acréscimo de turnos de trabalho por dia, foram avaliados três cenários, o primeiro com um turno de oito horas de trabalho, o segundo cenário com dois turnos de trabalho por dia e o terceiro com três turnos de trabalho por dia.

No quarto experimento foram realizadas simulações variando a quantidade de equipamentos onde ocorre o gargalo, foram avaliados três cenários, o primeiro com um equipamento, o segundo com dois equipamentos e o terceiro com três equipamentos, esse número definido pela diretoria da empresa.

#### **3.6.1 Primeiro experimento: volume de produção e indicadores do sistema atual**

A simulação através do modelo proposto resultou em uma produção de 21 treliças e a produção do sistema real é de 20 treliças. A tabela 4 demonstra os resultados da utilização dos equipamentos no sistema atual.

Tabela 4 – Utilização dos equipamentos no sistema atual

<b>Denominação do equipamento/locais</b>	<b>% Utilização</b>	<b>% Inativo</b>
Destopadeira	27,30	72,70
Palete 1	45,58	54,42
Palete 2	40,04	59,96
Prensa C	43,77	56,23
Serra Circular Pneumática	29,49	70,51
Serra Circular	2,33	97,67
Prensa <i>Roller</i>	4,14	95,86
Expedição	0,22	99,78
Estoque de Madeiras	99,81	0,19

Fonte: Autor

O local destinado ao recebimento das matérias primas é o único que apresenta uma porcentagem de utilização alta 99,81%, isso, pois não falta madeira para a produção dos componentes, em contrapartida entre os equipamentos foco desse estudo as taxas de utilização foram: para a destopadeira 27,30%, prensa “C” 43,77%, serra circular pneumática 29,49%, serra circular 2,33% e prensa *roller* 4,14%. Todas as taxas obtidas foram muito baixas evidenciando um grande percentual de inatividade das máquinas. Havendo com isso muita possibilidade de melhoria da produção do sistema analisado.

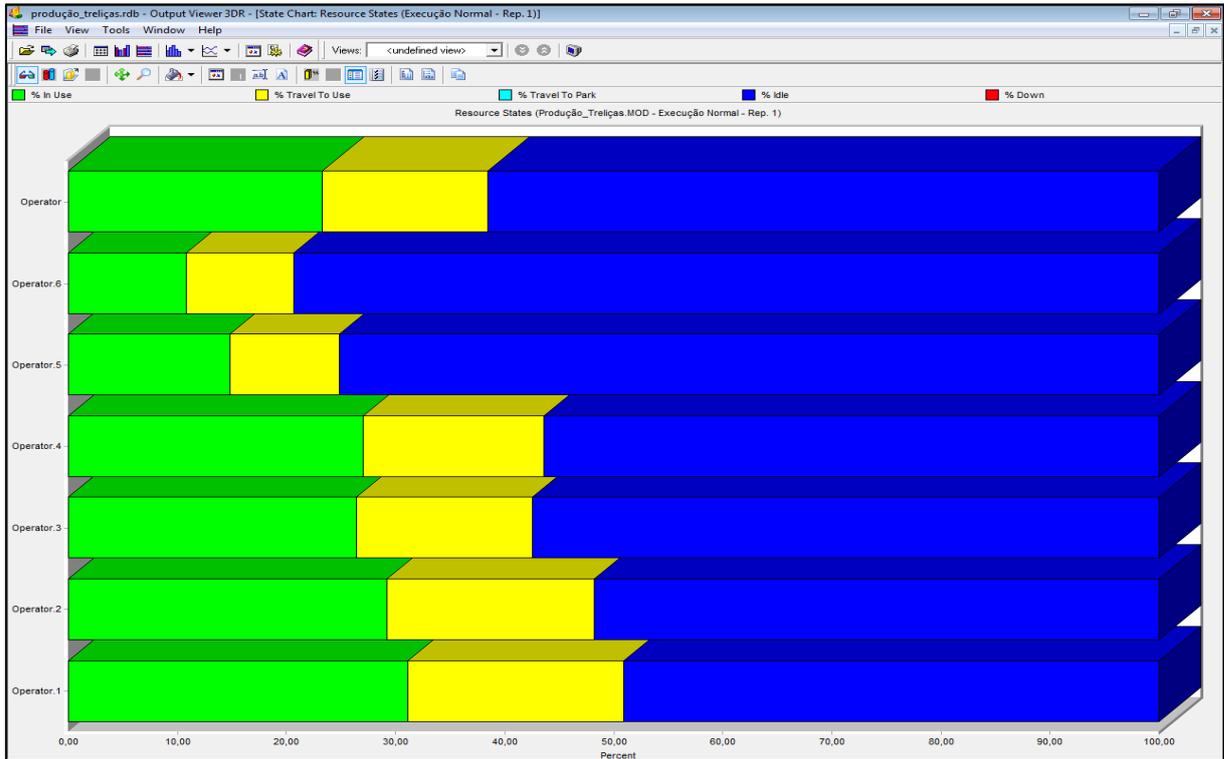
A tabela 5 representa a taxa de utilização dos recursos para o modelo simulado. A figura 26 ilustra de forma gráfica a taxa de utilização, percentual em uso, em movimentação até o posto de trabalho e o percentual inativo.

Tabela 5 - Percentual de utilização dos recursos

<b>Denominação do recurso</b>	<b>% Utilização</b>	<b>% Em Uso</b>	<b>% Em Movimentação</b>	<b>% Inativo</b>
Operador 1	50,95	31,16	19,79	49,05
Operador 2	48,26	29,25	19,01	51,74
Operador 3	42,57	26,38	16,19	57,43
Operador 4	43,56	27,02	16,54	56,44
Operador 5	24,84	14,80	10,04	75,16
Operador 6	20,68	10,81	9,88	79,32
Média dos Operadores	38,48	23,24	15,24	61,52

Fonte: Autor

Figura 26 - Taxa de utilização dos recursos



Fonte: Autor

A melhor percentagem de utilização foi obtida pelo operador 1, que foi de 50,95% e a menor taxa de utilização foi obtida de operador 6 que foi de 20,68% as duas taxas obtidas foram baixas o que mostra que seis operadores podem estar além do necessário gerando uma ociosidade e gastos desnecessários.

Com a percentagem em uso o comportamento foi o mesmo, o melhor período de uso foi obtido pelo operador 1 de 31,16% enquanto que o pior foi obtido pelo operador 6 de 10,81% novamente são valores muito baixos.

O operador 1 obteve maior taxa de movimentação, de 19,79% e o operador 6 obteve a menor taxa de movimentação, de 9,88%, no caso do operador 6 a taxa de movimentação ficou muito próximo da taxa de uso o que mostra que o operador é muito pouco utilizado na operação efetivamente.

Com relação ao percentual inativo o operador 1 foi o que obteve menor taxa de 49,05% enquanto que o operador 6 obteve a maior taxa de 79,32%. Na figura 36 é possível verificar as altas taxa de inatividade dos seis operadores.

Diante dos quatro indicadores, podemos observar que os seis operadores da linha atual são muito pouco utilizados necessitando de um estudo para melhorar o desempenho.

### 3.6.2 Segundo experimento: mudança no número de operadores

Com objetivo de verificar o comportamento do volume produzido, utilização dos equipamentos e recursos, foram realizadas mais quatro simulações variando a quantidade de operadores. A tabela 6 demonstra a variação do volume produzido para os quatro cenários propostos.

Tabela 6 - Número de operadores *versus* volume de produção

<b>Cenários</b>	<b>Treliças fabricadas</b>
1º Cenário (3 Operadores)	17
2º Cenário (6 Operadores)	21
3º Cenário (9 Operadores)	24
4º Cenário (12 Operadores)	24

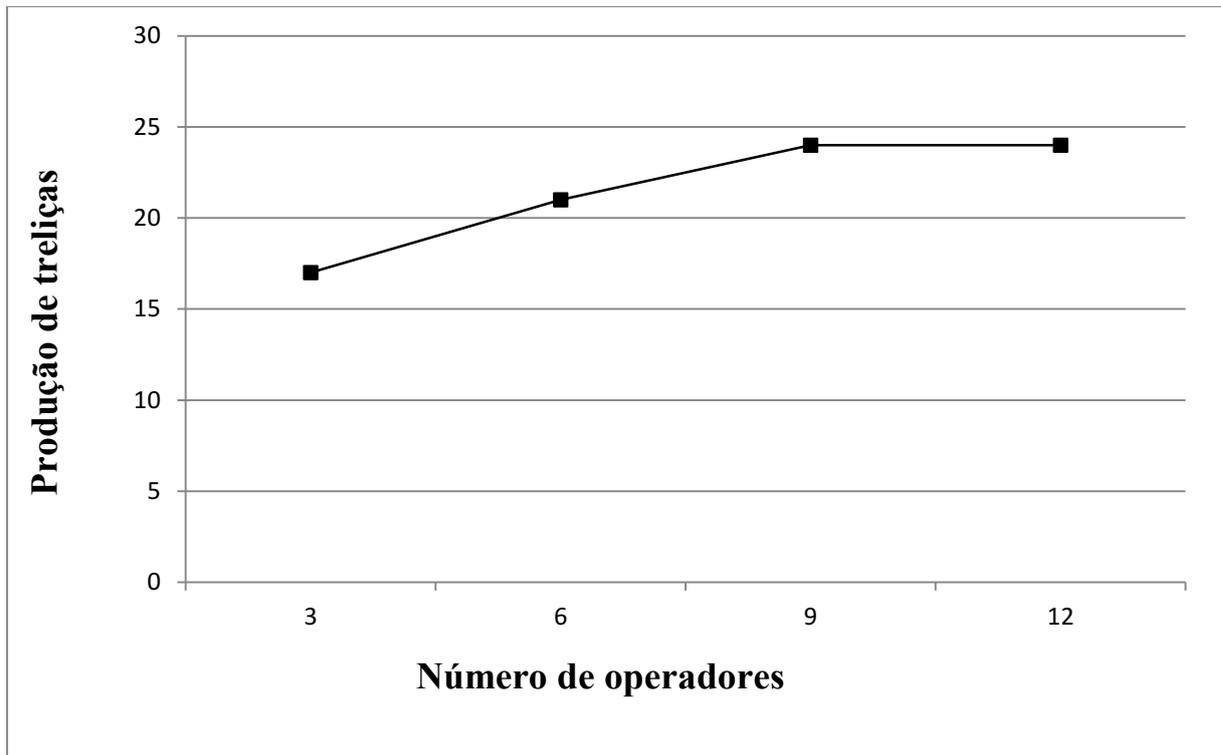
Fonte: Autor

A produção atual da linha em estudo é de 21 treliças com 6 operadores, com o aumento de três operadores o acréscimo foi de apenas 3 treliças ou aproximadamente 14% enquanto que diminuindo três operadores a redução foi de 4 treliças ou aproximadamente 19%.

O líder do setor ressaltou que com a redução no número de operadores tem-se uma redução no volume de produção, porém ele não soube estimar em quantas unidades. Tanto as operações como os transportes são realizados pelos operadores, então com a redução de um operador ocorre uma sobrecarga de trabalho sobre os outros operadores com consequente diminuição da produção. A redução do número de operadores é realizada quando a demanda de trabalho diminui. Para ele a simulação é muito útil justamente para auxiliar na determinação da quantidade de operadores utilizar em determinada demanda.

Ainda segundo o líder a quantidade máxima de operadores para operar a linha é de nove operadores, pois já tentaram acrescentar mais do que nove operadores, porém não houve o correspondente aumento do volume de produção, porque alguns operadores ficavam ociosos e acabavam atrapalhando os outros.

A figura 27 representa o comportamento da produção de treliças diante da variação no número de operadores, a produção aumentou até 9 operadores a partir desse ponto manteve-se constante, mostrando que na situação atual não se tem aumento de produção caso inserir mais do que 9 operadores para operar a linha em estudo.

Figura 27 - Gráfico da produtividade *versus* número de operadores

Fonte: Autor

A tabela 7 mostra o comportamento dos tempos em operação dos equipamentos com a variação no número de operadores.

Tabela 7 – Percentual de utilização dos equipamentos com a variação de operadores

Denominação do equipamento/locais	% Utilização com 3 operadores	% Utilização com 6 operadores	% Utilização com 9 operadores	% Utilização com 12 operadores
Destopadeira	31,14	27,30	20,64	20,80
Palete 1	40,97	45,58	46,37	45,86
Palete 2	45,69	40,04	44,06	44,52
Prensa C	38,14	43,77	47,77	48,27
Serra Circular Pneumática	31,98	29,49	33,58	34,60
Serra Circular	12,36	2,33	1,77	1,72
Prensa Roller	3,84	4,14	4,23	4,24
Expedição	0,18	0,22	0,24	0,25
Estoque de Madeiras	99,81	99,81	99,81	99,81

Fonte: Autor

Com o acréscimo no número de operadores foi possível verificar um aumento na taxa de utilização da prensa C, na serra circular pneumática e prensa *roller*. Em contrapartida houve uma redução no tempo de operação da destopadeira e serra circular.

Segundo o líder do setor com o aumento do número de operadores as máquinas continuam sendo muito pouco utilizadas, pois o problema está na máquina inicial que bloqueia a liberação de trabalhos para as outras máquinas.

A tabela 8 representa a percentagem de utilização dos operadores de acordo com o aumento da sua quantidade.

Tabela 8 - Percentual de utilização dos operadores com a variação no número de operadores

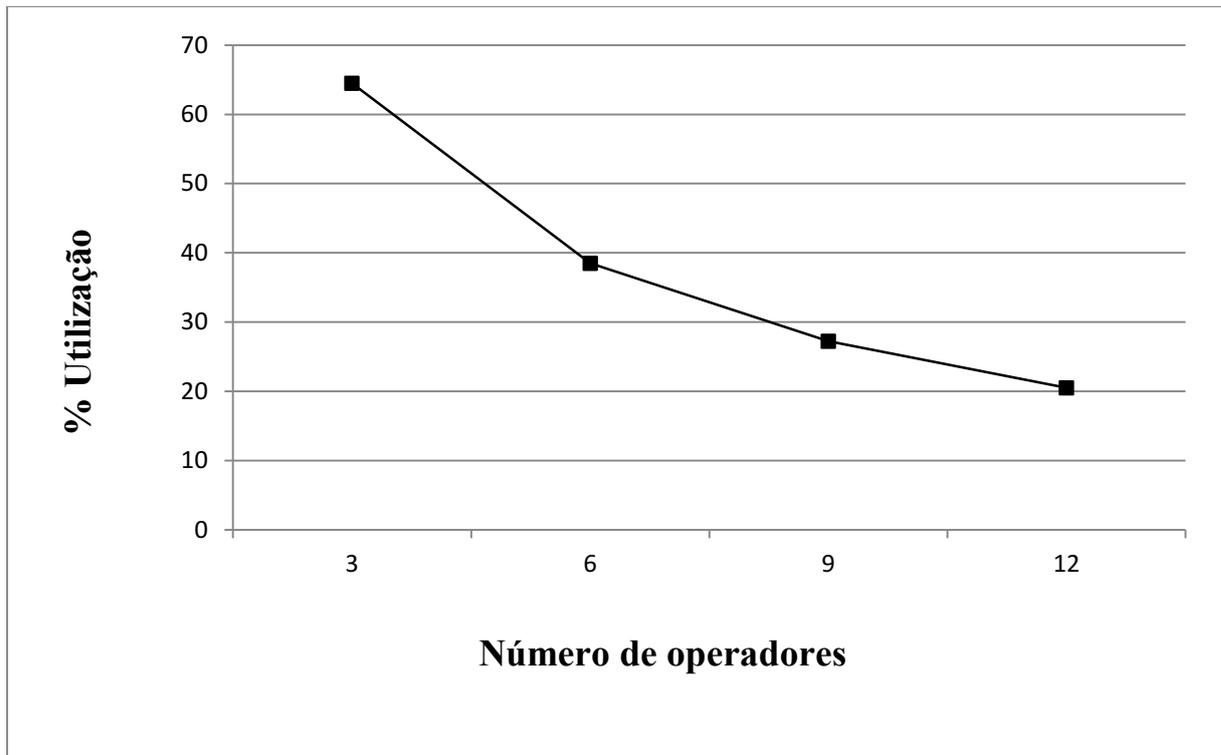
<b>Denominação do recurso</b>	<b>% Utilização com 3 operadores</b>	<b>% Utilização com 6 operadores</b>	<b>% Utilização com 9 operadores</b>	<b>% Utilização com 12 operadores</b>
Operador 1	67,78	50,95	37,93	39,17
Operador 2	65,70	48,26	36,02	33,85
Operador 3	60,03	42,57	40,93	31,20
Operador 4	-	43,56	36,02	21,78
Operador 5	-	24,84	29,12	21,71
Operador 6	-	20,68	25,54	15,99
Operador 7	-	-	12,34	31,83
Operador 8	-	-	14,77	11,45
Operador 9	-	-	12,38	12,63
Operador 10	-	-	-	12,01
Operador 11	-	-	-	12,29
Operador 12	-	-	-	2,49
Média dos Operadores	64,50	38,48	27,23	20,53

Fonte: Autor

O tempo médio de utilização dos operadores foi maior quando foram utilizados apenas três operadores para a linha em estudo, não são necessários muitos operadores e quanto maior a quantidade menor a taxa de utilização e conseqüentemente maior a ociosidade e os custos de produção e custo final do produto.

Na figura 28 é representado o gráfico que ilustra o comportamento da percentagem de utilização de acordo com o número de operadores.

Figura 28 - Grau de utilização dos operadores *versus* a quantidade de operadores



Fonte: Autor

### 3.6.3 Terceiro experimento: variação no número de turnos de trabalho

No terceiro experimento foi verificado o comportamento da produção de treliças com o aumento do número de horas trabalhadas, para isso foram realizadas três simulações com um turno, dois e três turnos de trabalho.

Para realizar as simulações, como o objetivo principal da pesquisa foi o aumento do volume de produção, as simulações foram realizadas com nove operadores.

A tabela 9 representa o número de treliças produzidas por turno de trabalho.

Tabela 9 - Turnos de trabalho *versus* volume de produção

Cenários	Treliças fabricadas
1º Cenário (1 Turno de trabalho)	24
2º Cenário (2 Turnos de trabalho)	48
3º Cenário (3 Turnos de trabalho)	73

Fonte: Autor

A quantidade de treliças produzidas em dois turnos dobrou e em três turnos triplicou, como já era esperado.

O percentual de utilização dos equipamentos foi o mesmo para todos os turnos, como representado na tabela 10.

Tabela 10 – Percentual de utilização dos equipamentos com variação de turnos de trabalho

<b>Denominação do equipamento/locais</b>	<b>% Utilização com 1 turno</b>	<b>% Utilização com 2 turnos</b>	<b>% Utilização com 3 turnos</b>
Destopadeira	20,64	20,86	20,67
Palete 1	46,37	48,56	50,40
Palete 2	44,06	44,71	45,89
Prensa C	47,77	47,55	47,74
Serra Circular Pneumática	33,58	62,29	74,14
Serra Circular	1,77	3,05	9,10
Prensa <i>Roller</i>	4,23	4,29	4,34
Expedição	0,24	0,24	0,25
Estoque de Madeiras	99,81	99,90	99,93

Fonte: Autor

O percentual de utilização média dos 9 operadores foi aproximadamente 27%, como representado na tabela 11, além de ser baixo não houve alteração entre os turnos.

Tabela 11 - Percentual de utilização dos operadores com variação de turnos de trabalho

<b>Denominação do recurso</b>	<b>% Utilização com 1 turno</b>	<b>% Utilização com 2 turnos</b>	<b>% Utilização com 3 turnos</b>
Operador 1	37,93	40,78	43,41
Operador 2	36,02	39,58	42,50
Operador 3	40,93	38,49	38,08
Operador 4	36,02	35,49	34,24
Operador 5	29,12	27,75	26,93
Operador 6	25,54	23,90	20,38
Operador 7	12,34	12,38	12,42
Operador 8	14,77	13,39	13,09
Operador 9	12,38	12,19	13,68
Média dos Operadores	27,23	27,11	27,19

Fonte: Autor

Com este experimento foi possível verificar o aumento do volume de produção com o acréscimo de turnos de trabalho, a produção dobrou entre um turno e outro, em contrapartida, os equipamentos e operadores apresentaram baixas taxas de utilização.

Para o líder do setor o aumento de turnos de trabalho aumenta a produção, porém ele não acredita que dobra pois durante a troca de um turno para outro ocorre uma redução de

produção e depende muito de como o turno anterior deixou as máquinas e matérias primas. O líder sugere ainda que antes de ampliar o turno as máquinas sejam melhor aproveitadas, como por exemplo, prensar mais treliças por vez na prensa *roller*. Antigamente utilizava-se ampliar o turno quando se tinha aumento de demanda, porém percebeu-se que a produção não era proporcional a quantidade de turnos, por isso hoje em dia prefere-se remanejar operadores e fazer algumas horas extras a criar turnos de trabalho.

### 3.6.4 Quarto experimento: variação no número de equipamentos

No quarto experimento foi verificado o comportamento do volume de produção de treliças com o aumento no número de equipamentos gargalos, na simulação considerando seis operadores e um turno de oito horas de trabalho por dia foi verificado os seguintes percentuais de recursos bloqueados, 89,35% de banco superior e inferior, 87,87% de montantes e 90% de diagonais. Os três elementos saem do mesmo equipamento que é a destopadeira, portanto foi o equipamento foco desse experimento.

Para realizar as simulações como o objetivo principal da pesquisa foi o aumento do volume de produção as simulações novamente foram realizadas com nove operadores e um turno de oito horas de trabalho por dia.

A tabela 12 representa o número de treliças produzidas pela linha com o aumento no número do equipamento destopadeira.

Tabela 12 – Volume de produção com o aumento do equipamento destopadeira

<b>Cenários</b>	<b>Treliças produzidas</b>	<b>% Variação</b>
1º Cenário (1 Destopadeira)	24	0,0
2º Cenário (2 Destopadeiras)	41	70,83
3º Cenário (3 Destopadeiras)	54	125,0

Fonte: Autor

Com a simulação do sistema com duas destopadeiras a produção aumentou aproximadamente 71% e com três treliças houve um aumento de 125% no volume de treliças, em relação à situação com uma destopadeira e nove operadores.

A tabela 13 representa o percentual de utilização de todos os equipamentos com a variação no número de destopadeira. As percentagens de utilização aumentaram com o acréscimo de destopadeira, os resultados mais expressivos foram nos equipamentos serra

circular pneumática, serra circular e prensa *roller*, com 75,33%, 60,78% e 7,27% para duas destopadeiras, respectivamente, enquanto que para três equipamentos os percentuais foram 80,98%, 68,0% e 10,23% respectivamente.

Tabela 13 – Percentual de utilização dos equipamentos com o acréscimo de destopadeiras

<b>Denominação do equipamento/locais</b>	<b>% Utilização com 1 destopadeira</b>	<b>% Utilização com 2 destopadeiras</b>	<b>% Utilização com 3 destopadeiras</b>
Destopadeira	20,64	27,70	35,89
Palete 1	46,37	46,98	48,58
Palete 2	44,06	45,19	48,23
Prensa C	47,77	48,94	50,82
Serra Circular Pneumática	33,58	75,33	80,98
Serra Circular	1,77	60,78	68,0
Prensa <i>Roller</i>	4,23	7,27	10,23
Expedição	0,24	0,41	0,54
Estoque de Madeiras	99,81	99,80	99,79

Fonte: Autor

O percentual médio de utilização dos nove operadores aumentou com o número de destopadeira acrescentada, sendo 27,23% para uma destopadeira, 48,81% para duas destopadeiras e 68,67% para três destopadeiras, como mostrado na tabela 14. Com o aumento no número do equipamento gargalo aumentou-se o número da produção de treliças e com isso os operadores foram melhores aproveitados reduzindo o tempo de ociosidade.

Tabela 14 - Percentual de utilização dos operadores com o acréscimo de destopadeiras

<b>Denominação do recurso</b>	<b>% Utilização com 1 destopadeira</b>	<b>% Utilização com 2 destopadeiras</b>	<b>% Utilização com 3 destopadeiras</b>
Operador 1	37,93	68,82	76,75
Operador 2	36,02	65,52	75,05
Operador 3	40,93	61,88	75,29
Operador 4	36,02	56,28	71,92
Operador 5	29,12	48,39	69,45
Operador 6	25,54	40,91	67,69
Operador 7	12,34	39,03	65,14
Operador 8	14,77	35,82	61,35
Operador 9	12,38	22,66	55,36
Média dos Operadores	27,23	48,81	68,67

Fonte: Autor

Para o líder do setor o equipamento gargalo também é a destopadeira, além de acrescentar mais duas máquinas o líder reduziria a distância entre todas as máquinas do setor e manteria no máximo nove operadores no setor.

### 3.6.5 Análise da viabilidade econômico-financeira e implementação

A linha de produção atual trabalha com seis operadores, uma destopadeira, uma prensa “C”, uma serra circular pneumática, uma serra circular e uma prensa *roller* e um turno de trabalho. Os resultados obtidos com o auxílio da simulação computacional mostraram que para o maior aumento no volume de produção da linha foi necessário utilizar nove operadores e três destopadeiras, com isso o volume de produção da linha foi 125% maior, o que representa um acréscimo de 30 treliças.

As mudanças não serão realizadas na linha instalada atualmente, pois a empresa está construindo uma nova linha de produção e espera utilizar os resultados desse trabalho para dimensionar a nova linha de produção.

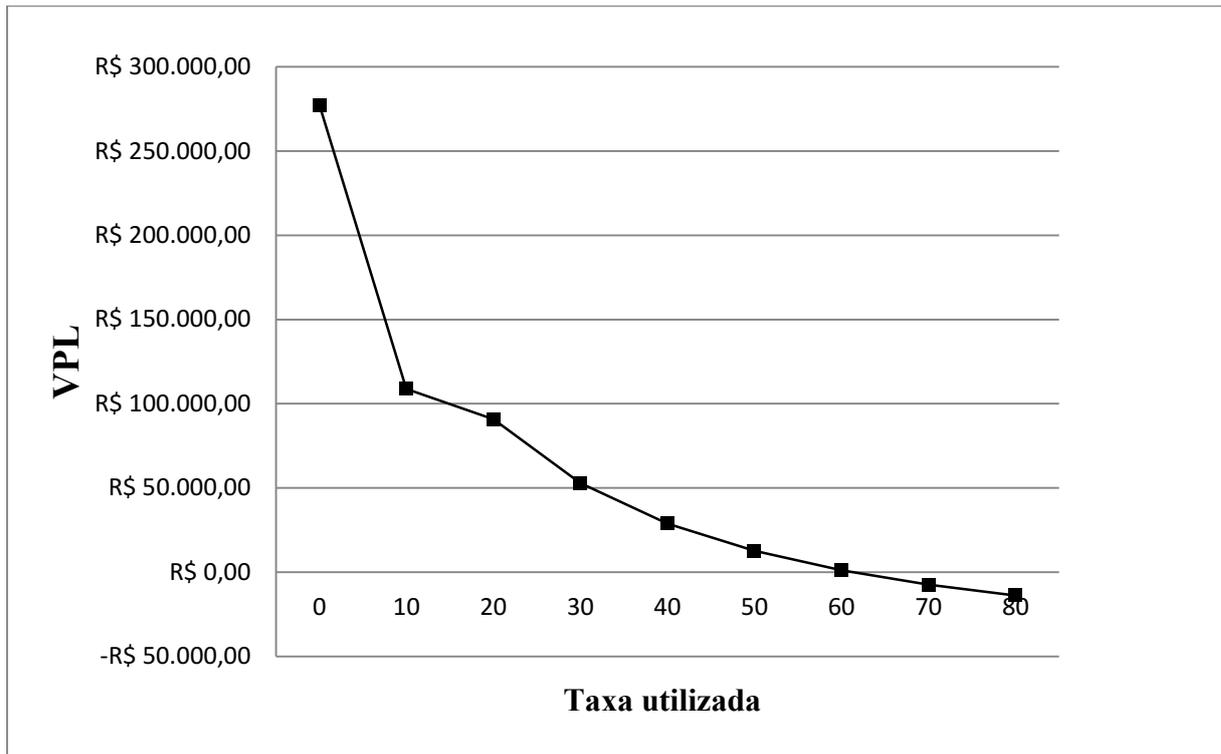
Uma análise de viabilidade econômico-financeira foi realizada para verificar as alternativas de investimento proposto. Para o cálculo da viabilidade econômico-financeira foram consideradas as seguintes informações:

- a) valor de duas novas destopadeiras (R\$ 55.000,00), a ser paga à vista e depreciada em dez anos;
- b) custo de instalação da nova máquina, incluindo obras civis (R\$ 5.500,00);
- c) custo anual de manutenção das novas máquinas (R\$ 20.000,00);
- d) custo mensal de três operadores (R\$ 7.563,00);
- e) regime de trabalho do setor, considerando um turno, oito horas por dia, cinco dias por semana, vinte dias por mês;
- f) indicadores financeiros utilizados pela empresa (taxa mínima de atratividade - TMA de 10,0%, inflação de 6,0% aa para os próximos anos, imposto de renda na faixa de 30% aa);
- g) produção da nova linha de 600 treliças por mês ( $54-24=30 \times 20=600$ ), com uma margem média de contribuição estimada em R\$ 22,50 por item.

O cálculo do valor presente líquido - VPL e da taxa interna de retorno - TIR considerou um período de dez anos, depreciação do equipamento e valores tributáveis pelo Imposto de Renda. O valor presente líquido - VPL obtido, considerando a taxa mínima de

atratividade - TMA de 10,0%, praticado pela empresa foi de R\$ 108.791,00. Como se pode observar no gráfico da figura 29, que representa o valor presente líquido - VPL do investimento como função de diferentes taxas, o investimento continuaria viável para taxas mínimas de atratividade - TMA maiores, do que a empresa utiliza.

Figura 29 – Valor presente líquido - VPL do investimento a diferentes taxas



Fonte - Autor

A taxa interna de retorno (TIR) do projeto de investimento foi de 61,17%, muito superior ao valor da taxa mínima de atratividade (TMA). Já pelo método do *payback period*, considerando o valor do dinheiro no tempo, em dois anos e dois meses obtém-se o retorno do capital investido, prazo aceitável pela empresa por ser inferior ao ponto de corte, definido conceitualmente em cinco anos (MAUER, 2008; SOUZA, 2008).

Para um horizonte de planejamento de dez anos o retorno será obtido antes do terceiro ano que é um bom período, de acordo com Souza e Clemente (2008), o risco de um projeto aumenta à medida que o *payback period* se aproxima do final do horizonte de planejamento.

Independentemente do método utilizado para análise econômico-financeira do cenário proposto, constatou-se que o investimento nas duas destopadeiras e três operadores é viável. O cálculo do valor presente líquido (VPL), considerando a taxa mínima de atratividade (TMA) da empresa, foi superior a zero; a taxa interna de retorno (TIR) por sua vez foi

superior a taxa mínima de atratividade (TMA); o *payback period* resultou inferior ao ponto de corte da empresa. A observação dos valores obtidos para o valor presente líquido (VPL) e para a taxa interna de retorno (TIR) indica que mesmo aumentando a taxa mínima de atratividade (TMA) até 61,17%, o investimento continuaria dando retorno aos investidores.

Diante dos resultados obtidos com a simulação da produção de todos os cenários e pela análise econômico-financeira do investimento, recomenda-se que a empresa realize o investimento em mais duas destopadeiras e contrate mais três operadores, para obter um aumento no volume de produção. O retorno do investimento é alto, já que o valor presente líquido (VPL) é superior a R\$ 100.000,0 e a taxa interna de retorno (TIR) é aproximadamente seis vezes superior à taxa mínima de atratividade (TMA) da empresa.

## 4 CONCLUSÕES

A simulação computacional mostrou ser uma ferramenta extremamente eficaz no estudo de melhorias em um sistema dinâmico através da previsão de resultados e da possibilidade de realizar experimentos no sistema, sem a necessidade de alterar o sistema real. Além da possibilidade de avaliar as características de um sistema complexo como um todo, com todas as suas interações.

O mapeamento do processo produtivo possibilitou que os responsáveis do setor pudessem visualizar o caminho percorrido por componente do produto, bem como levantar os tempos de processamento do produto final. Por meio do mapeamento do fluxo de processos foram aferidos os dados como, a distância entre as máquinas, os tempos de processamento, os caminhos percorridos por cada elemento e o *layout* do sistema. O mapeamento ainda possibilitou verificar quais mudanças podem ser realizadas para melhorar o sistema.

No primeiro experimento, onde foram simuladas as condições atuais do sistema, os equipamentos da linha de produção apresentaram um percentual de utilização muito baixo, sendo o mais alto de aproximadamente 44% da utilização do equipamento prensa “C”. Com a simulação computacional foi possível verificar que os equipamentos do sistema são pouco aproveitados e o sistema pode ser melhorado para obter maior utilização e volume de produção.

Com a simulação do sistema real foi possível verificar que os seis operadores da linha também são pouco utilizados com um percentual médio de aproximadamente 39%. A simulação mostrou o que a direção da empresa desconhecia; sendo assim, propostas de melhoria foram feitas para aumentar o nível de aproveitamento dos recursos.

No segundo experimento, onde foi avaliado o volume de produção com a variação no número de operadores, a maior produção de treliças foi obtida com nove operadores. Os melhores percentuais de utilização dos equipamentos foram obtidos considerando-se doze operadores, e novamente no equipamento prensa “C”, verificou-se a maior taxa de utilização (aproximadamente 48%). Porém, o volume produzido manteve-se igual ao do cenário com nove operadores.

Ainda no segundo experimento foi possível verificar que o percentual de utilização dos operadores reduziu à medida que a quantidade de operadores foi aumentada.

No terceiro experimento, onde foi avaliada a produtividade com a variação nos turnos de trabalho, a simulação de turnos de trabalho mostrou um aumento linear no volume de

produção. Como já era esperado, não houve aumento no percentual de utilização dos equipamentos e recursos, se mantendo muito baixos.

Já no quarto experimento, onde foi avaliado o volume de produção com o acréscimo de equipamentos gargalo, que nesse caso foi identificado como sendo o equipamento destopadeira, foi possível observar um aumento de 125% no número de treliças produzidas em relação à situação atual, que considera seis operadores e uma destopadeira. Com relação ao percentual de utilização dos equipamentos, também houve um aumento de utilização de todos os equipamentos. No caso da utilização dos operadores foi possível observar um aumento no percentual dessa utilização.

A simulação computacional também serviu para gerar dados utilizados na análise de viabilidade econômico-financeira do investimento. A análise do investimento levou em consideração os métodos do *payback period*, do valor presente líquido – VPL e da taxa interna de retorno – TIR. Os três métodos são complementares e todos concluíram pela realização do investimento em duas destopadeiras e contratação de três colaboradores.

O *software* ProModel apresentou os resultados e estatísticas de forma bem clara, possibilitando a visualização rápida e simples do sistema, da movimentação dos recursos e da utilização dos equipamentos. Para a análise das distribuições estatísticas dos tempos de operação do processo, o próprio *software* ProModel possui o *software* Stat::Fit que sugere o ajuste das principais distribuições de probabilidades aos dados, indicando a qualidade destes ajustes.

Os resultados obtidos nesta pesquisa foram apresentados para a diretoria da empresa que, por se tratar de uma empresa familiar, não conheciam a simulação computacional e ficaram muito surpresos com a rapidez de obtenção e precisão dos resultados. Além disso, o líder do setor avaliou positivamente a utilização da simulação computacional como ferramenta de apoio a tomada de decisões; até então as decisões eram tomadas com base nas experiências dos responsáveis e sem considerar a dinâmica do sistema.

A simulação computacional mostrou-se uma ótima ferramenta para auxiliar nos processos de tomada de decisão em uma indústria de pequeno porte do ramo madeireiro, podendo ser útil na determinação dos recursos, equipamentos, volume de produção e na visualização dos resultados gerados por alguma mudança proposta antes mesmo de realizar a mudança *in locu*. Outro ponto verificado foi que, na maioria dos casos, as decisões são tomadas baseadas na experiência de algumas pessoas envolvidas e que não levam em consideração a dinâmica do sistema.

Os resultados dessa pesquisa serão aproveitados na montagem da nova linha de produção que está sendo executada em outro local, bem como, novos cenários podem ser avaliados utilizando a modelagem proposta.

Durante a elaboração e evolução deste trabalho foram surgindo ideias que podem ser aplicadas em futuras pesquisas, como segue.

Realizar um novo estudo considerando simulações com os operadores fixos nos postos de trabalho e comparar com o volume de produção com os colaboradores multitarefas, como apresentado nesta pesquisa.

Nesta pesquisa não foram realizadas modificações no *layout*; uma sugestão seria realizar um novo estudo propondo mudanças no *layout*, como a redução das distâncias entre os equipamentos, de forma a obter a melhor produtividade bem como o melhor aproveitamento dos equipamentos e recursos.

## REFERÊNCIAS

- ABUKHOUSA, E. et al. Simulation and modeling efforts to support decision making in healthcare supply chain management. **The Scientific World Journal**, v. 2014, fev. 2014. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/354246/>>. Acesso em: 29 out. 2015.
- ANJARD, R. P. Process mapping: one of three, new, special quality tools for management, quality and all other professionals. **Microelectronics Reliability** Grã-Bretanha, v. 36, n. 2, p. 223-225, 1996. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0026271495000546>>. Acesso em: 30 out. 2015.
- ALVES, R. **Simulação da dinâmica operacional de um restaurante universitário de pequeno porte: um estudo de caso**. 2012, 81 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1087>>. Acesso em: 30 out. 2015.
- ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para a análise de decisão**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- ALMEIDA, R. C.; ALMEIDA, M. F.; MEDEIROS, K. F. Análise do processo produtivo e a identificação de gargalos na produção de caulim. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 24., 2009, Salvador, **Anais...** Salvador, 2009. p. 2-14. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009\\_TN\\_STO\\_091\\_621\\_13252.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_TN_STO_091_621_13252.pdf)>. Acesso em: 30 out. 2015.
- BANKS, J. Introduction to simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 31., 1999, **Proceedings...** USA: ACM, 1999. p. 7-13. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=324142>>. Acesso em: 30 out. 2015.
- BERGUE, L. X. **Análise das potencialidades do uso da ferramenta de simulação computacional em operações logísticas: estudo de caso em um armazém geral**. 2000. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/1510>>. Acesso em: 30 out. 2015.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Modeling and simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, p. 241-264, 2002. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/01443570210414338>>. Acesso em: 30 out. 2015.
- BRIGHENTI, J. R. N. **Simulação e Otimização de uma linha de manufatura em fase de projeto**. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0030278.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2015.

CHEUNG, W.; ZHOU, H. Using genetic algorithms and heuristics for job shop scheduling with sequence-dependent setup times. **Operations Research**, Basel, v.107, n.1, p. 65-81, out. 2001. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1023/A:1014990729837>>. Acesso em: 30 out. 2015.

CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N. **Just in time, MRP II e OPT: um enfoque estratégico**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1996.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.

DOMINGOS, J. C. et al. Um sistema de apoio à decisão para scheduling em job shop, utilizando lógica fuzzy. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais...**, Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008, p. 1-14. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008\\_TN\\_STO\\_069\\_491\\_11235.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STO_069_491_11235.pdf)>. Acesso em: 30 out. 2015.

DUARTE, R. N. **Simulação computacional: análise de uma célula de manufatura em lotes do setor de auto-peças**. 2003. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003. Disponível em: <<http://www.iepg.unifei.edu.br/arnaldo/download/dissertacoes/dissertacao%20roberto.pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2015.

FARIAS, A. A.; SOARES, J. F.; CÉSAR, C. C. **Introdução à estatística**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

FERREIRA, J. C. E.; MOURA, É. B.; RIBEIRO, L. P. G. O uso da simulação para aumentar a competência da industrial junto ao mercado externo. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 21., 2001, Salvador, **Anais eletrônicos...** Salvador: ENEGEP, 2001. p. 8. Disponível em: <<http://www.grima.ufsc.br/papers/PapEnegep2001LuizPaulo.pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2015.

FÁVERO, L. P. et al. **Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões**. 1. ed. São Paulo: Elsevier, 2009.

FU, M. C. Optimization for simulation: theory vs. practice. **Journal on Computing**, v.14, n.3, p.192-215, Summer 2002. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.86.3684&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2015.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da produção e operações**. 8. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2002.

GRAVINA, J. B. **Validação de sistemas de apoio à decisão, desenvolvimento para o mercado de opções**. 2002. 100 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/51113/000465525.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 03 nov. 2015.

GRANADOS, M. R.; HERNÁNDEZ, J. E.; LYONS, A. C. A discrete-event simulation model for supporting the first-tier supplier decision-making in a UK's automotive industry. **Journal of Applied Research and Technology**, v. 12, p. 860-870, Oct. 2014.

Disponível em:

<[http://apps.elsevier.es/watermark/ctl\\_servlet?\\_f=10&pident\\_articulo=90371985&pident\\_usuario=0&pcontactid=&pident\\_revista=81&ty=24&accion=L&origen=zonadelectura&web=www.elsevier.es&lan=en&fichero=81v12n05a90371985pdf001.pdf](http://apps.elsevier.es/watermark/ctl_servlet?_f=10&pident_articulo=90371985&pident_usuario=0&pcontactid=&pident_revista=81&ty=24&accion=L&origen=zonadelectura&web=www.elsevier.es&lan=en&fichero=81v12n05a90371985pdf001.pdf)>. Acesso em: 03 nov. 2015.

HARREL, C. R. et al. **Simulação: otimizando os sistemas**. 2. ed. São Paulo: IMAM, 2002.

HARREL, C. R.; PRICE, R. N. Simulation modeling using ProModel technology. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 35., 2002, San Diego. **Proceedings... USA: WSC**, 2002. p. 192-198. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1030843>>. Acesso em: 03 nov. 2015.

HEINRICH, D. **Simulação da produção de madeira serrada**. 2010. 159 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/21104/000737035.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

INGALLS, R. G. Introduction to simulation. In WINTER SIMULATION CONFERENCE, 35., 2002, San Diego. **Proceedings... USA: WSC**, 2002. p. 7-16. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1030457&dl=ACM&coll=DL&CFID=558869644&CFTOKEN=75549240>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

KELLNER, M. I.; MADACHY, R. J.; RAFFO, D. M. Software process simulation modeling: Why? What? How? **The Journal of Systems and Software**, USA, v. 46, p. 91-105, 11 Nov. 1998. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0164121299000035>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

KUMAR, S.; PHROMMATHED, A. Improving a manufacturing process by mapping and simulation of critical operations. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 17, n. 1, p. 104-132, 2005. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/17410380610639533>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

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

LEAL, F.; PINHO, A. F.; CORRÊA, K. E. S. Análise comparativa de técnicas de mapeamento de processo aplicadas a uma célula de manufatura. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 12., 2005, Bauru, **Anais... Bauru**, 2005, p. 6. Disponível em: <[http://www.simpep.feb.unesp.br/anais\\_simpep\\_aux.php?e=12](http://www.simpep.feb.unesp.br/anais_simpep_aux.php?e=12)>. Acesso em: 05 nov. 2015.

LIM, M.K.; ZHANG, Z. A multi-agent based manufacturing control strategy for responsive manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, 2003, n. 139, p. 379-384, 2003. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603005351>>. Acesso em: 05 nov. 2015.

LOBÃO, E. C.; PORTO, A. J. V. Proposta de sistematização de estudos de simulação. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 22., 1997, Gramado, **Anais...** Gramado: ABEPRO, 1997. Disponível em:

<[http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGERP1997\\_T1101.PDF](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGERP1997_T1101.PDF)>. Acesso em: 05 nov. 2015.

LOBÃO, E. C.; PORTO, A. J. V. Evolução das técnicas de simulação. **Revista Produção**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 13-22, 1999. Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-65131999000100002&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-65131999000100002&script=sci_arttext)>. Acesso em: 06 nov. 2015.

MAUER, C. O. **Proposta de uma sistemática de avaliação de investimentos em tecnologia da informação**. 2008. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) –

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2008. Disponível

em:<[http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/publicacoes/277\\_Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Cris%20Mauer.pdf](http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/publicacoes/277_Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Cris%20Mauer.pdf)>. Acesso em: 06 nov. 2015.

MARIA, A. Introduction to modeling and simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1997, USA, **Proceedings...** 1997. p. 7-13. Disponível em: <

<http://www.informs-sim.org/wsc97papers/0007.PDF>>. Acesso em: 06 nov. 2015.

MELLO, C. H. P.; SALGADO, E. G. Mapeamento dos processos em serviços: estudo de caso em duas pequenas empresas da área de saúde. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 25., 2005, Porto Alegre: ABEPRO, **Anais...** Porto Alegre, 2005. p. 1715-1722. Disponível em:

<[http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGERP2005\\_Enegep0207\\_0556.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGERP2005_Enegep0207_0556.pdf)>. Acesso em: 06 nov. 2015.

06 nov. 2015.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Produção**, [S.l.], v. 17, n. 1, p. 216-219, Jan./Abr. 2007. Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132007000100015&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt)

[65132007000100015&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132007000100015&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 06 nov. 2015.

MIGUEL, P. A. C. et al. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MONTEVECHI, J. A. et al. Análise comparativa entre regras heurísticas de sequenciamento da produção aplicada em job shop. **Produto & Produção**, [S.l.], v. 6, n. 2, p. 12-18, jun. 2002. Disponível em:

2002. Disponível em:

<<http://www.seer.ufrgs.br/index.php/ProdutoProducao/article/view/1438/383>>. Acesso em: 06 nov. 2015.

MOREIRA C. M. **Estratégias de reposição de estoques em supermercados: avaliação por meio de simulação.** 2001. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/82028/178147.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 06 nov. 2015.

MOREIRA, D. **Administração da produção e operações.** 5. ed. São Paulo: Pioneira, 2000.

NAGANO, M. S.; MOCCELLIN, J. V.; LORENA, L. A. N. Redução do estoque em processamento em sistemas de produção flow shop permutacional. **Revista Produção**, Florianópolis, v. 5, n. 3, set. 2005. Disponível em: <[http://www.lac.inpe.br/~lorena/nagano/176\\_2005.pdf](http://www.lac.inpe.br/~lorena/nagano/176_2005.pdf)>. Acesso em: 07 nov. 2015.

NAGANO, M. S.; MOCCELLIN, J. V. Redução do estoque em processamento em sistemas de produção flow shop. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 37., 2005, Gramado, **Anais...** [S.l.; s.n.], 2005. p. 176-184. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2005/pdf/arq0133.pdf>>. Acesso em 07 nov. 2015.

OLIVEIRA, U. R.; MONTEVECHI, J. A. B.; MARINS, F. A. S. Integração entre o mapeamento de processos e a simulação de eventos discretos: o caso de uma montadora de pneus. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 27., 2007, Foz do Iguaçu, **Anais...** Foz do Iguaçu: ABEPRO, 2007, p. 1-11. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2007\\_TR620464\\_8898.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2007_TR620464_8898.pdf)>. Acesso em: 07 nov. 2015.

OLIVEIRA, E. P. **Modelo conceitual de um sistema de apoio à decisão, para gestores de logística e transporte de canais de exportação agrícola.** 2007. 241 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/90434/241077.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 07 nov. 2015.

OLIVEIRA, G. S.; TURRIONI, J. B. O problema de flow shop híbrido: revisão e classificação. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 32., 2012, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: ABEPRO, 2012. p. 1-13. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2012\\_TN\\_STO\\_157\\_914\\_19845.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2012_TN_STO_157_914_19845.pdf)>. Acesso em: 07 nov. 2015.

PERALES, W. Classificação dos sistemas de produção. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 21., 2001, Salvador, **Anais...** Salvador: ABEPRO, 2001. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2001\\_TR111\\_0830.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2001_TR111_0830.pdf)>. Acesso em: 07 nov. 2015.

PEREIRA, I. C. **Proposta de sistematização da simulação para fabricação em lotes.** 2000. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2000. Disponível em: <<http://www.iepg.unifei.edu.br/arnaldo/download/dissertacoes/dissertacao%20Ivan.PDF>>. Acesso em: 07 nov. 2015.

PINEDO, M. L. **Scheduling: theory, algorithms and systems**. New Jersey: Prentice-Hall, 1995.

PINEDO, M. L. **Scheduling: theory, algorithms and systems**. 3rd ed. New York, NY, Springer Science+Business Media, LLC, 2008.

PIDD, M. Five simple principles of modelling. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1996, Coranado, **Proceedings...** Coranado, 1996. p. 721-728. Disponível em: <<http://www.informs-sim.org/wsc96papers/104.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2015.

PIDD, M. **Modelagem Empresarial: ferramentas para tomada de decisão**. Porto Alegre: Bookman, 1998.

PROMODEL. **Pro Model User Guide**. USA, 2002.

RIVERO, L. E. B. Applications in logistics using simulation with ProModel. In: INTERNATIONAL LATIN AMERICA AND CARIBBEAN CONFERENCE FOR ENGINEERING AND TECHNOLOGY, 2., 2004, Miami, **Anais...** 2004. p.1-6. Disponível em: <[https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB0QFjAAahUKEwiUgvOrmv\\_IAhXLC5AKHaAwDsk&url=http%3A%2F%2Fwww.laccei.org%2Fpapers%2Fpapers%2FEE\\_007.doc&usg=AFQjCNFL0tVHs92Q-edcR9SdGryK3hc1MQ&sig2=O-p50RacfKSJYivXmJixDQ](https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB0QFjAAahUKEwiUgvOrmv_IAhXLC5AKHaAwDsk&url=http%3A%2F%2Fwww.laccei.org%2Fpapers%2Fpapers%2FEE_007.doc&usg=AFQjCNFL0tVHs92Q-edcR9SdGryK3hc1MQ&sig2=O-p50RacfKSJYivXmJixDQ)>. Acesso em: 07 nov. 2015.

RODRIGUEZ, L. A. O. **Modelo de tomada de decisão integrando teoria das restrições, programação linear inteira e simulação: estudo de caso na indústria siderúrgica**. 2009. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. Disponível em: <[http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/99352/rodriguez\\_lao\\_me\\_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/99352/rodriguez_lao_me_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 07 nov. 2015.

SAKURADA, N.; MIYAKE, D. I. Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços. **Gestão & Produção**, São Carlos, v.16, n.1, p.25-43, jan./mar. 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/gp/v16n1/v16n1a04.pdf>>. Acesso em: 09 nov. 2015.

SHANNON, R. E. Introduction to the art and science of simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1998, Washington, **Proceedings...** USA, 1998. p. 7-14. Disponível em: <<http://www.informs-sim.org/wsc98papers/001.PDF>>. Acesso em: 09 nov. 2015.

SAAD, S. M. The reconfiguration issues in manufacturing systems. **Journal of Materials Processing Technology**, 2003, n. 138, p. 277-283, 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603000852>>. Acesso em: 09 nov. 2015.

SEILA, A. F. Introduction to simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1995, USA, **Proceedings...** USA, 1995. p. 7-15. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=224401.224407>>. Acesso em: 09 nov. 2015.

SELLITTO, M. A.; BORCHARDT, M.; PEREIRA, G. M. Medição de tempo de atravessamento e inventário em processo em manufatura controlada por ordens de fabricação. **Produção**, v. 18, n. 3, p. 493-507, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/prod/v18n3/a07v18n3.pdf>>. Acesso em: 09 nov. 2015.

SILVA, C. R. N. **Aplicação de modelos de redes de filas abertas no projeto e planejamento de sistemas discretos de manufatura**. 2005. 274f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. Disponível em: <[http://www.btdt.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado/tde\\_arquivos/1/TDE-2005-07-07T12:48:23Z-722/Publico/TeseCRNS.pdf](http://www.btdt.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado/tde_arquivos/1/TDE-2005-07-07T12:48:23Z-722/Publico/TeseCRNS.pdf)>. Acesso em: 09 nov. 2015.

SILVA, E. B.; et al. Avaliação das regras de sequenciamento da produção em ambientes job shop e flow shop por meio da simulação computacional. **Exacta**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 70-81, 2012. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81023342007>>. Acesso em: 09 nov. 2015.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**, 4 ed. rev. atual., Florianópolis: UFSC, 2005.

SOUZA, A.; CLEMENTE, A. **Decisões financeiras e análise de investimentos: fundamentos, técnicas e aplicações**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

SOUZA, J. S. **Proposta de uma sistemática para análise multicriterial de investimentos**. 2008. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/117424/000636929.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 09 nov. 2015.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1974.

STEBEL, S. L.; et al. Scheduling de processos contínuos baseado nos recursos de estocagem. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 35., 2003, Natal. **Anais...** [s.n.], 2003. p. 2090–2096. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2003/pdf/arq0231.pdf>>. Acesso em: 09 nov. 2015.

TUBINO, D. F. **Planejamento e controle da produção: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção: estratégias, métodos e técnicas para condução de pesquisas quantitativas e qualitativas**. UNIFEI, 2012. Disponível em: <[http://www.carlosmello.unifei.edu.br/Disciplinas/Mestrado/PCM-10/Apostila-Mestrado/Apostila\\_Metodologia\\_Completa\\_2012.pdf](http://www.carlosmello.unifei.edu.br/Disciplinas/Mestrado/PCM-10/Apostila-Mestrado/Apostila_Metodologia_Completa_2012.pdf)>. Acesso em: 09 nov. 2015.

TSENG, M. M.; QINHAI, M.; SU, C. J. Mapping customers' service experience for operations improvement. **Business Process Management Journal**, v. 5, n. 1, p. 50-64, 1999. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/pdfplus/10.1108/14637159910249126>>. Acesso em: 09 nov. 2015.

VIEIRA, G. E. Uma revisão sobre a aplicação da simulação computacional em processos industriais. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 13., 2006, Bauru, **Anais...** Bauru, 2006, p. 10. Disponível em: <[http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais\\_13/artigos/676.pdf](http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/676.pdf)>. Acesso em: 09 nov. 2015.

**APÊNDICE A – Tempos de processamento coletados**

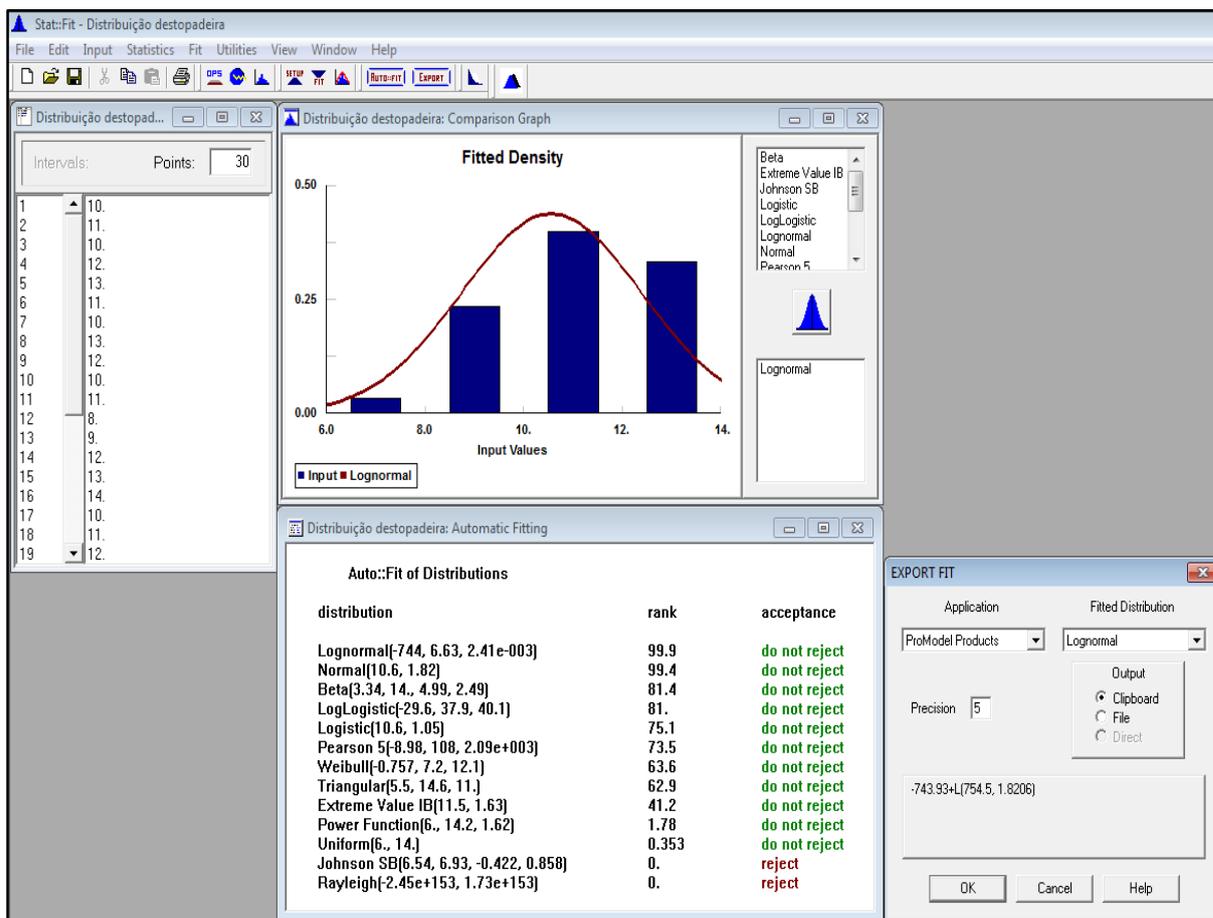
Tabela 15 - Amostras dos tempos de produção

<b>30 Amostras dos tempos de produção - setor de tesoura</b>					
<b>Descrição</b>	<b>Destopadeira (s)</b>	<b>Prensa C (s)</b>	<b>Serra circular (s)</b>	<b>Serra circular pneumática (s)</b>	<b>Prensa roller (min.)</b>
Amostra 1	10	62	6	8	14
Amostra 2	11	62	8	5	15
Amostra 3	10	63	7	6	17
Amostra 4	12	64	6	8	10
Amostra 5	13	60	6	6	12
Amostra 6	11	59	5	5	14
Amostra 7	10	61	9	7	15
Amostra 8	13	65	6	9	16
Amostra 9	12	64	7	8	10
Amostra 10	10	63	8	5	12
Amostra 11	11	60	6	6	13
Amostra 12	8	59	7	7	15
Amostra 13	9	61	6	8	16
Amostra 14	12	66	8	5	17
Amostra 15	13	59	6	6	13
Amostra 16	14	57	5	8	10
Amostra 17	10	55	9	7	12
Amostra 18	11	60	6	6	15
Amostra 19	12	63	7	6	14
Amostra 20	8	65	8	8	14
Amostra 21	9	59	7	7	16
Amostra 22	10	58	6	9	13
Amostra 23	6	57	9	5	15
Amostra 24	8	60	8	8	12
Amostra 25	9	60	6	6	14
Amostra 26	10	61	7	6	15
Amostra 27	12	64	6	5	14
Amostra 28	13	57	5	8	16
Amostra 29	11	66	8	8	13
Amostra 30	9	60	6	6	14

Fonte: Autor.

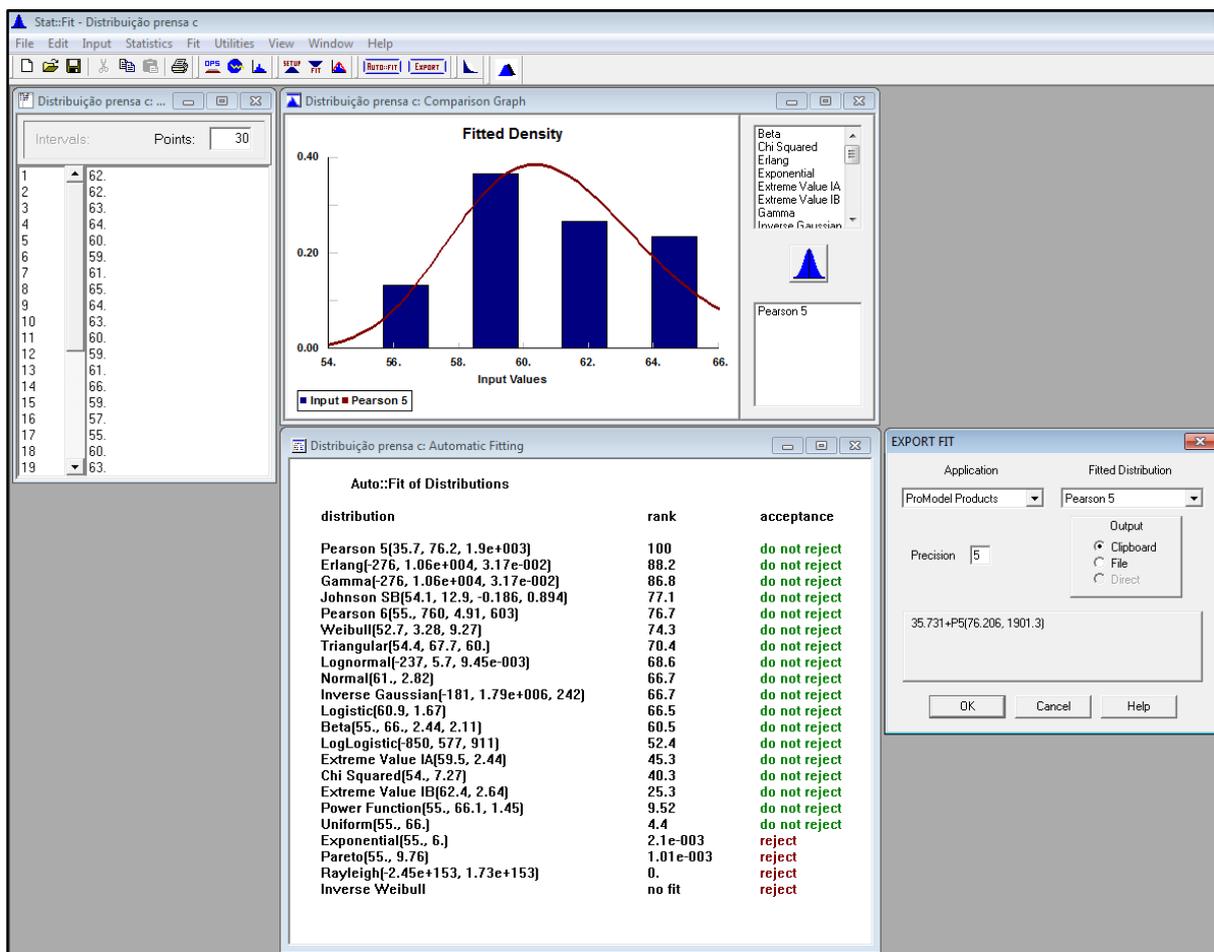
**APÊNDICE B** – Curvas de distribuição teórica de probabilidades

Figura 30 - Gráfico da distribuição ajustada para a máquina destopadeira



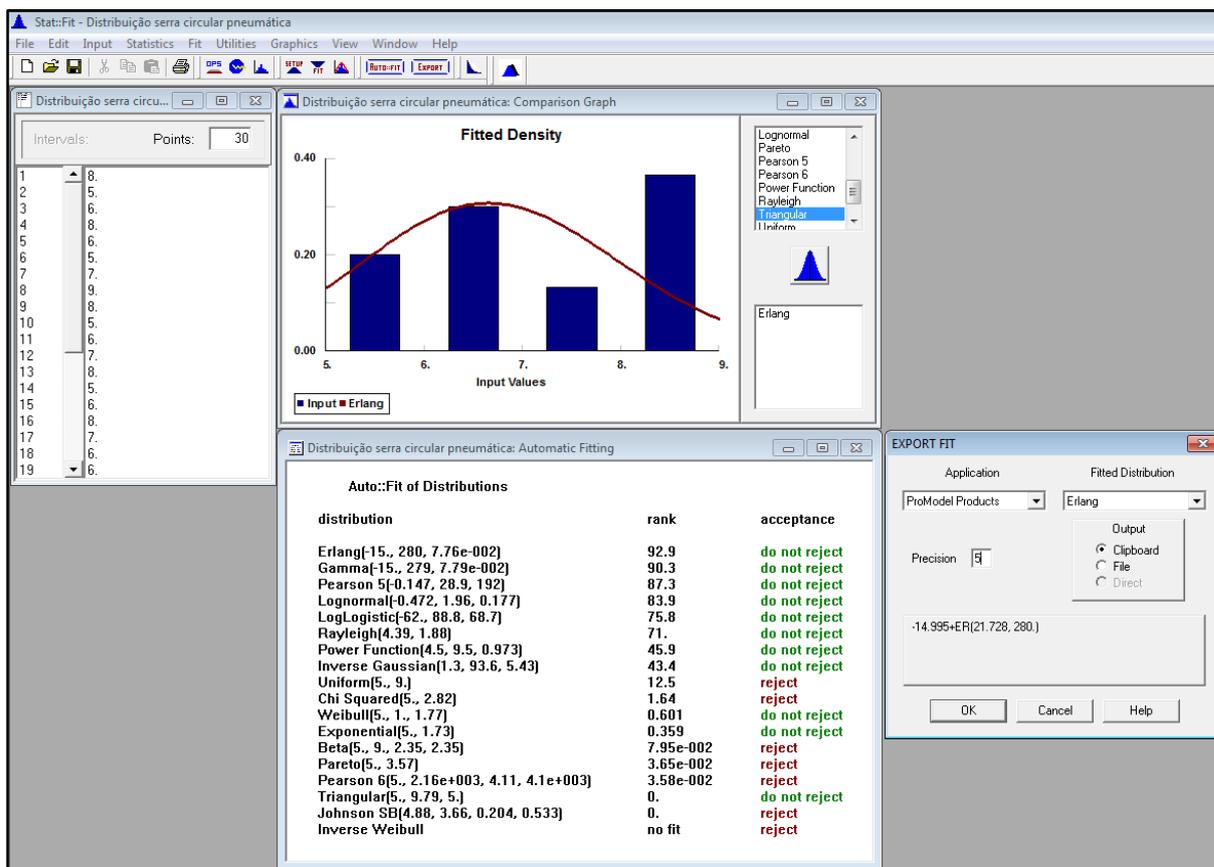
Fonte: Autor.

Figura 31 - Gráfico da distribuição ajustada para a máquina prensa c



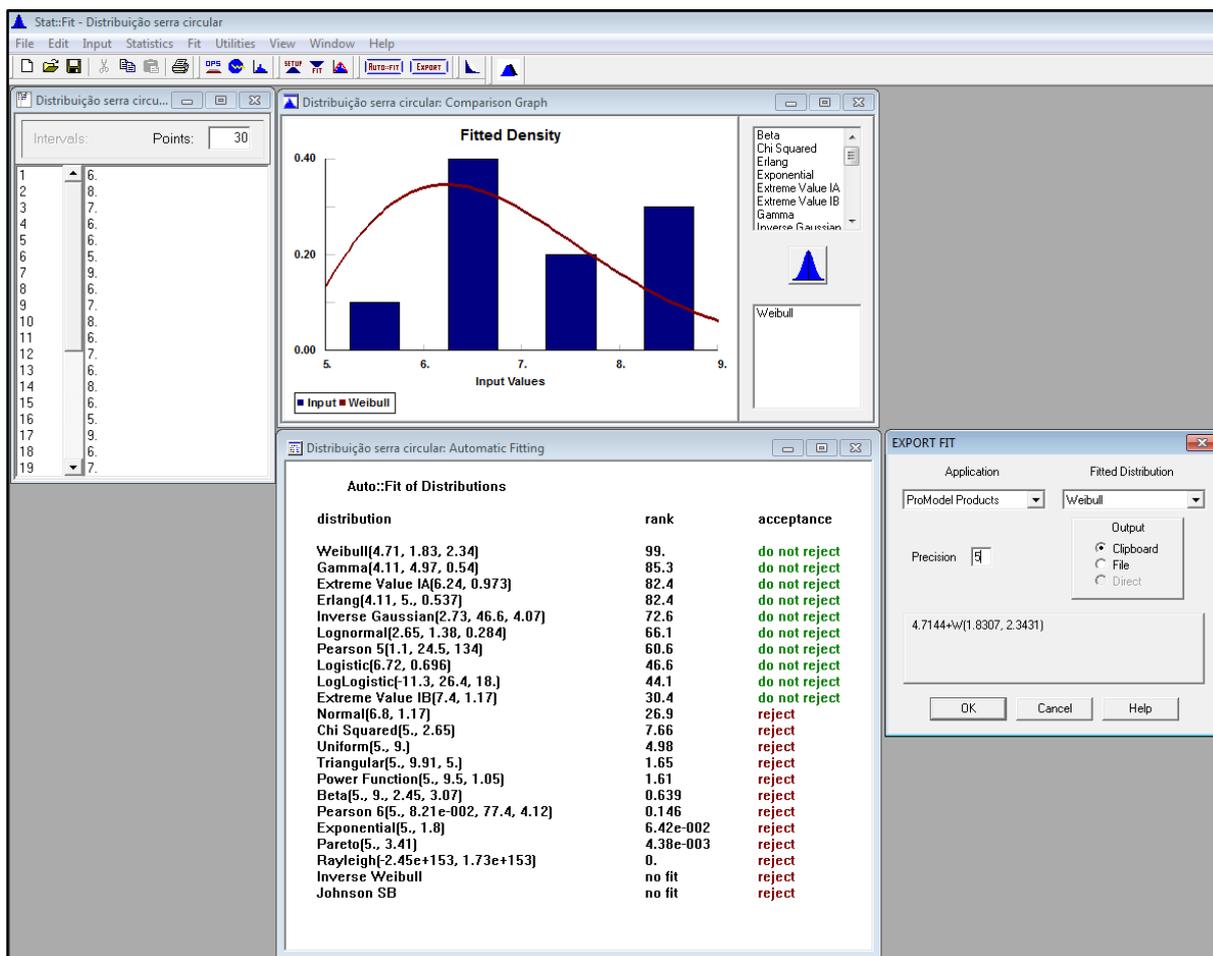
Fonte: Autor.

Figura 32 - Gráfico da distribuição ajustada para a máquina serra circular pneumática

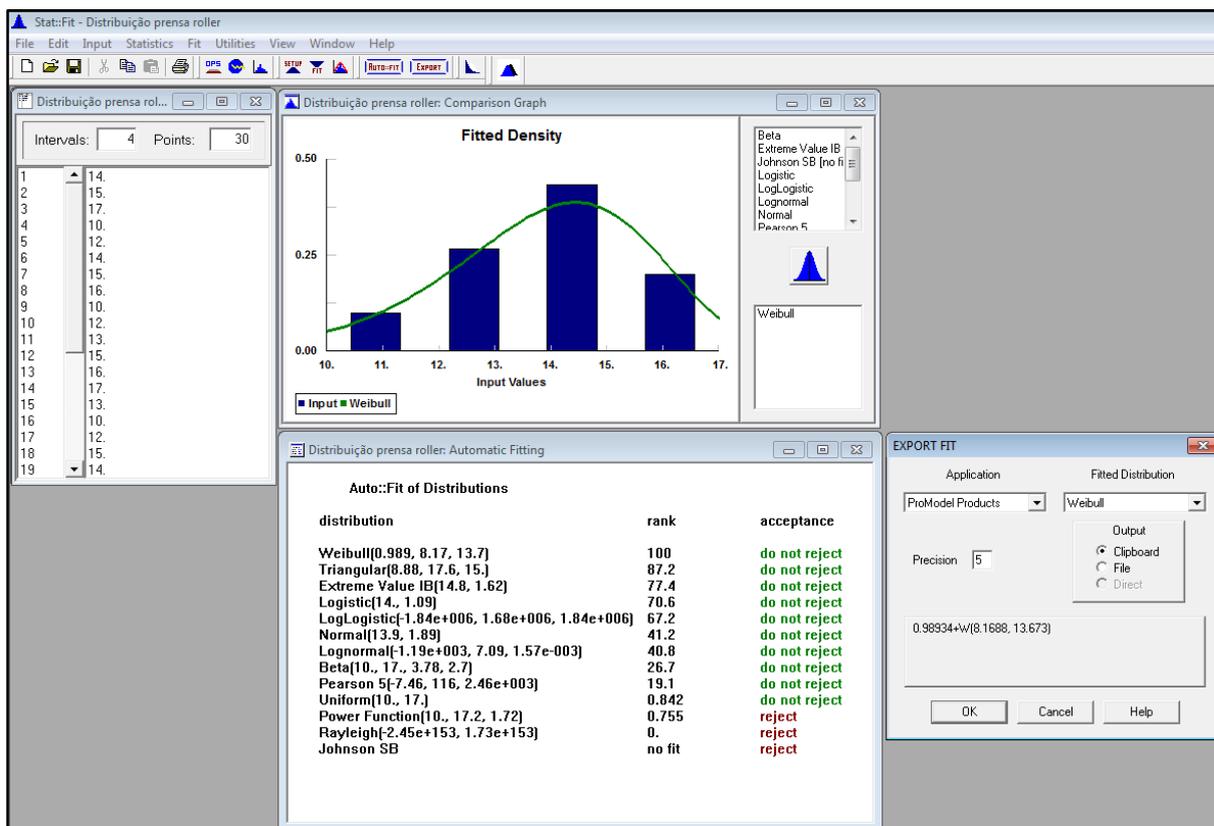


Fonte: Autor

Figura 33 - Gráfico da distribuição ajustada para a máquina serra circular



Fonte: Autor.

Figura 34 - Gráfico da distribuição ajustada para a máquina prensa *roller*

Fonte: Autor.

## APÊNDICE C - Programação do modelo no ProModel

```
*****
*
*      Listagem Formatada do Modelo:
*      E:\ProModel_Dissertação\Produção_Treliças.MOD
*
*****
```

Tempo: Segundos  
 Distância: Metros

```
*****
*
*      Locais
*
*****
```

Nome	Cap	Unidade	Estatísticas	Regras	Custo
-----	---	-----	-----	-----	-----
DESTOPADEIRA	1	1	Série de Tempo O Mais Velho,	, Primeiro	
PALLET_1	6	1	Série de Tempo O Mais Velho,	,	
PALLET_2	7	1	Série de Tempo O Mais Velho,	,	
PRENSA_C	7	1	Série de Tempo O Mais Velho,	, Primeiro	
SERRA_CIRCULAR_PNEUMÁTICA	6	1	Série de Tempo O Mais Velho,	, Primeiro	
SERRA_CIRCULAR	7	1	Série de Tempo O Mais Velho,	, Primeiro	
PRENSA_ROLLER	20	1	Série de Tempo O Mais Velho,	, Primeiro	
EXPEDIÇÃO	20	1	Série de Tempo O Mais Velho,	,	
ESTOQUE_DE_MADEIRAS	inf	1	Série de Tempo O Mais Velho,	,	

\*\*\*\*\*

\* **Entidades** \*

\*\*\*\*\*

Nome	Velocidade (mpm)	Estatísticas	Custo
-----	-----	-----	-----
MADEIRA	50	Série de Tempo	
BANZO_SUPERIOR_E_INFERIOR	50	Série de Tempo	
BANZO_MONTADO	50	Série de Tempo	
MONTANTES	50	Série de Tempo	
DIAGONAIS	50	Série de Tempo	
TRELIÇA	50	Série de Tempo	
GRUPO_DIAGONAIS	50	Série de Tempo	
GRUPO_MONTANTES	50	Série de Tempo	

\*\*\*\*\*

\* **Redes de Caminho** \*

\*\*\*\*\*

Nome	Tipo	T/S	De	Para	BI	String	Fator de Velocidade
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Red1	Passante	Velocidade & Distância	R1	R2	Bi	3	1
			R2	R3	Bi	3	1
			R2	R4	Bi	3	1
			R2	R5	Bi	7.5	1
			R5	R6	Bi	8.6	1
			R4	R7	Bi	12	1
			R3	R8	Bi	15	1
			R8	R6	Bi	9	1
			R7	R6	Bi	7	1
			R6	R9	Bi	10	1

\*\*\*\*\*

\* **Interfaces** \*

\*\*\*\*\*

Red	Nó	Local
Red1	R1	ESTOQUE_DE_MADEIRAS
	R2	DESTOPADEIRA
	R5	PRENSA_C
	R4	PALLET_2
	R3	PALLET_1
	R8	SERRA_CIRCULAR_PNEUMÁTICA
	R7	SERRA_CIRCULAR
	R6	PRENSA_ROLLER
	R9	EXPEDIÇÃO

\*\*\*\*\*

\* **Mapeamento** \*

\*\*\*\*\*

Red	De	Para	Dest
Red1	R2	R1	
	R3	R2	
	R4	R2	
	R5	R2	
	R6	R5	
	R7	R4	
	R8	R3	
	R2	R3	
	R2	R4	
	R6	R7	
	R2	R5	
	R7	R6	
	R8	R6	
	R4	R7	
	R5	R6	
	R3	R8	
	R6	R8	
	R6	R9	

\*\*\*\*\*

\* **Recursos** \*

\*\*\*\*\*

Nome	Unid	Rec Estatísticas	Ent Pesquisar	Pesquisar	Caminho	Movimentação	Custo
Operator	6	Por Unidade	Mais Próximo	Mais Velha	Red1	Vazio: 20 mpm Base: R2 Cheio: 10 mpm	

\*\*\*\*\*

\* **Processamento** \*

\*\*\*\*\*

Processo			Roteamento				
Entidade	Local	Operação Bl	Saída	Destino	Regra	Lógica de Movimento	
MADEIRA	ESTOQUE_DE_MADEIRAS	WAIT 1 SEC	1 MADEIRA	DESTOPADEIRA	FIRST 1	MOVE WITH Operator THEN FREE	
MADEIRA	DESTOPADEIRA	WAIT -743.93+L(754.5, 1.8206) SEC	1 BANZO_SUPERIOR_E_INFERIOR	PRENSA_C	TURN 1	MOVE WITH Operator THEN FREE	
			MONTANTES	PALLET_2	TURN	MOVE WITH Operator THEN FREE	
			DIAGONAIS	PALLET_1	TURN	MOVE WITH Operator THEN FREE	
DIAGONAIS	PALLET_1	GROUP 6 AS GRUPO_DIAGONAIS					
GRUPO_DIAGONAIS	PALLET_1		1 GRUPO_DIAGONAIS	SERRA_CIRCULAR_PNEUMÁTICA	FIRST 1	MOVE WITH Operator THEN FREE	
MONTANTES	PALLET_2	GROUP 7 AS GRUPO_MONTANTES					
GRUPO_MONTANTES	PALLET_2		1 GRUPO_MONTANTES	SERRA_CIRCULAR	FIRST 1	MOVE WITH Operator THEN FREE	

\*\*\*\*\*  
 \* **Processamento** \*  
 \*\*\*\*\*

Processo			Roteamento			
Entidade	Local	Operação Bl	Saída	Destino	Regra	Lógica de Movimento
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
BANZO_SUPERIOR_E_INFERIOR	PRENSA_C	WAIT 35.731+P5(76.206, 1901.3) SEC COMBINE 7 AS BANZO_MONTADO	1 BANZO_MONTADO	PRENSA_C		FIRST 1 MOVE WITH Operator THEN FREE
BANZO_MONTADO	PRENSA_C		1 BANZO_MONTADO	PRENSA_ROLLER		FIRST 1 MOVE WITH Operator THEN FREE
GRUPO_MONTANTES	SERRA_CIRCULAR	WAIT 4.7144+W(1.8307, 2.3431)SECUNGROUP				
MONTANTES	SERRA_CIRCULAR		1 MONTANTES	PRENSA_ROLLER		JOIN 1 MOVE WITH Operator THEN FREE
GRUPO_DIAGONAIS	SERRA_CIRCULAR_PNEUMÁTICA	WAIT -14.995+ER(21.728, 280.)SECUNGROUP				
DIAGONAIS	SERRA_CIRCULAR_PNEUMÁTICA		1 DIAGONAIS	PRENSA_ROLLER		JOIN 1 MOVE WITH Operator THEN FREE
BANZO_MONTADO	PRENSA_ROLLER	JOIN 6 DIAGONAIS JOIN 7 MONTANTES TreVar =TreVar+1	1 TRELIÇA	PRENSA_ROLLER		FIRST 1 MOVE WITH Operator THEN FREE
TRELIÇA	PRENSA_ROLLER	WAIT 0.98934+W(8.1688, 13.673)MIN	1 TRELIÇA	EXPEDIÇÃO		FIRST 1 MOVE WITH Operator THEN FREE
TRELIÇA	EXPEDIÇÃO	WAIT 1 MIN	1 TRELIÇA	EXIT		FIRST 1

\*\*\*\*\*  
 \* **Chegadas** \*

Entidade	Local	Quantidade	PrimeiraVez	Ocorrências	Frequência	Lógica
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
MADEIRA	ESTOQUE_DE_MADEIRAS	1	0	inf	1	

\*\*\*\*\*  
 \* **Variáveis (globais)** \*

Nome	Tipo	Valor Inicial	Estatísticas
-----	-----	-----	-----
TreVar	Inteiro	0	Série de Tempo