

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONAL**

BERNARDO BREGOLI SOARES

**A UTILIZAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA
ANÁLISE E MODIFICAÇÃO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE PINTURAS
AUTOMOTIVAS**

CAXIAS DO SUL

2013

BERNARDO BREGOLI SOARES

**A UTILIZAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA
ANÁLISE E MODIFICAÇÃO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE PINTURAS
AUTOMOTIVAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica pela Universidade de
Caxias do Sul.

Área de concentração: Projeto e fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Joanir Luís Kalnin

**CAXIAS DO SUL
2013**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
UCS - BICE - Processamento Técnico

S676u Soares, Bernardo Bregoli
A utilização do modelo de simulação computacional para análise e modificação de um sistema de produção de pinturas automotivas / Bernardo Bregoli Soares. 2013.
128 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2013.
Orientação: Prof. Dr.: Joanir Luís Kalnin

1. Simulação (sistema de controle). 2. Sistema de produção.
3. Pintura - automóveis. I. Título.

CDU : 681.5.017

Índice para catálogo sistemático:

- | | |
|------------------------------------|------------|
| 1. Simulação (sistema de controle) | 681.5.017 |
| 2. Sistema de produção | 658.5 |
| 3. Pintura - automóveis | 75:629.331 |

Catalogação na fonte elaborada pela bibliotecária
Carolina Machado Quadros – CRB 10/2236.

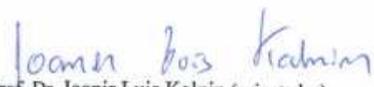
"A utilização do modelo de simulação computacional para a análise e modificação de um sistema de produção de pinturas automotivas".

Bernardo Bregoli Soares

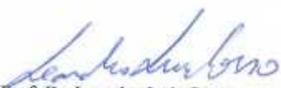
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Projeto e Fabricação.

Caxias do Sul, 12 de agosto de 2013.

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Joanir Luis Kalnin (orientador)
Universidade de Caxias do Sul


Prof. Dra. Giovana Pasa
Universidade Federal do Rio Grande do Sul


Prof. Dr. Leandro Luis Corso
Universidade de Caxias do Sul


Prof. Dr. Carlos Alberto Costa
Universidade de Caxias do Sul

À Dani, meu amor. Ao meu pai, meu exemplo de coragem. À minha mãe, meu anjo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me auxiliaram neste desafio. Principalmente à Eisenmann, pelas oportunidades; à Randon, pela confiança; ao Mestre Joanir, pela orientação; e ao meu grande colega de Mestrado, e agora companheiro de time de trabalho, Tiago.

Sábio é aquele que não se põe a reclamar
perante um problema, mas se põe,
alegremente, a resolvê-lo.

Willian Shakespeare

RESUMO

O presente trabalho descreve a utilização da simulação computacional aplicada ao ambiente da fábrica em uma empresa de pinturas automotivas, visando analisar propostas de modificação futura na fábrica, para o atendimento de um novo patamar de demanda de produção. O processo de pintura ocorre em uma linha de produção intermitente, com movimentação por meio de pontes rolantes automáticas. Tal sistema *flow shop* é composto principalmente das operações de jateamento, pintura *e-coat* (eletrodeposição) e *top-coat* (pó). O desafio consiste na análise estruturada do processo produtivo através de métodos científicos, no caso a simulação computacional, e não apenas do conhecimento dos gestores da empresa, visando a rapidez e o embasamento sólido para a tomada de decisões perante diferentes cenários de mercado. Buscou-se uma solução considerando o conhecimento de especialistas que atuam no sistema, concomitantemente à análise por meio de simulação produtiva. Foi utilizada a metodologia de pesquisa-ação como estrutura para o projeto de simulação computacional. O *software* de simulação empregado foi o *Tecnomatix Plant Simulation*, da Empresa Siemens. Dentre os resultados, observou-se uma economia de 64% em relação ao investimento necessário para o aumento de capacidade proposto.

Palavras-chave: Simulação de produção. Projeto da fábrica. *Tecnomatix Plant Simulation*.
Pinturas automotivas.

ABSTRACT

This paper describes the use of computer simulation applied to the factory environment for an automotive paintshop, in order to analyze proposals for future modification in the factory, to meet a new level of production demand. The painting process occurs on intermittently production line, with conveying by automatic cranes. The flow shop system consists mainly of blasting, e-coat (electrodeposition) and top-coat (powder) painting operations. The challenge consists of a structured analysis of the production process using scientific methods, in this case the computer simulation, and not only the tacit knowledge of the company's managers, aiming fastness and solid foundation for making decisions with regard to different market scenarios. The solution was sought considering the knowledge of experts who work in the system, simultaneously to the analysis by production simulation. The research-action methodology was applied as a structure for the computer simulation and modeling. The simulation software used was the Tecnomatix Plant Simulation, from Siemens Company. Considering the results, a reduction of 64% was achieved on the investment required to the proposed capacity increase.

Keywords: Production simulation. Factory project. Tecnomatix Plant Simulation. Automotive painting.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – A função de produção | 17 |
| Figura 2 – Tipos de processo produtivo | 19 |
| Figura 3 – Ponto de impacto e zona comprimida por ação da granalha..... | 22 |
| Figura 4 – Exemplo de máquina de jateamento | 22 |
| Figura 5 – Fluxograma básico das etapas de pré-tratamento..... | 23 |
| Figura 6 – Mecanismo do processo de desengraxe químico | 24 |
| Figura 7 – Fotos microscópicas de um processo de fosfatização adequado e inadequado | 25 |
| Figura 8 – Escala das camadas de fosfato. | 26 |
| Figura 9 – Eletrodeposição catódica..... | 27 |
| Figura 10 – Relação corrente elétrica e espessura de camada..... | 28 |
| Figura 11 – Composição do banho de <i>e-coat</i> | 28 |
| Figura 12 – Exemplo de sistema de pintura <i>top-coat</i> pó..... | 29 |
| Figura 13 – Esquema de um equipamento de aplicação de pintura pó..... | 30 |
| Figura 14 – Exemplo de janela de cura | 31 |
| Figura 15 – Peça entrando em estufa de cura | 31 |
| Figura 16 – Critério de seleção do método de análise..... | 34 |
| Figura 17 – Maneiras para o estudo de um sistema..... | 35 |
| Figura 18 – Esquema do processo de modelamento | 41 |
| Figura 19 – Exemplo de produto da Randon Implementos..... | 43 |
| Figura 20 – Exemplo de chassi a ser processado na PEC | 44 |
| Figura 21 – Vistas isométrica da barra de carga..... | 45 |
| Figura 22 – Ilustração do carregamento da barra de carga..... | 46 |
| Figura 23 – Exemplos de gancheiras..... | 46 |
| Figura 24 – Exemplos de ponte rolante automática | 47 |
| Figura 25 – Diagrama do fluxo de processo de chassis..... | 48 |
| Figura 26 – Ilustração do fluxo de chassis | 49 |
| Figura 27 – Diagrama do fluxo de peças..... | 50 |
| Figura 28 – Ilustração do fluxo de peças..... | 51 |
| Figura 29 – Estrutura da pesquisa-ação aliada ao projeto de simulação | 53 |
| Figura 30 – Fluxo da simulação computacional..... | 54 |
| Figura 32 – Layout com localização das pontes rolantes | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 33 – Modelo de simulação | 63 |
| Figura 34 – <i>Frame</i> com as tabelas para inserção dos parâmetros de processo | 65 |
| Figura 35 – Tipos de objetos empregados no modelo | 65 |
| Figura 36 – Fragmento de código de programação (método <code>getSuccessor</code>)..... | 66 |
| Figura 37 – <i>Frame</i> com os elementos utilizados para a coleta de dados estatísticos | 68 |
| Figura 38 – Gráfico dos modelos simulados em relação ao tempo de ciclo médio | 87 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|-----|
| Quadro 1 – Análise de capacidade e demanda | 15 |
| Quadro 2 – Características dos sistemas de operação por tipo de operação..... | 20 |
| Quadro 3 – Comparativo entre fosfato de ferro, o fosfato de zinco e o nanocerâmico..... | 26 |
| Quadro 4 – Áreas de aplicação dos modelos..... | 33 |
| Quadro 5 – Uso dos modelos (% das organizações que responderam)..... | 33 |
| Quadro 6 – Vantagens e riscos da simulação computacional..... | 39 |
| Quadro 7 – Quantidades de barras de carga | 57 |
| Quadro 8 – Mix de produção | 57 |
| Quadro 9 – Tempos de processo nos postos de trabalho | 58 |
| Quadro 10 – Tempos de estufagem e resfriamento | 59 |
| Quadro 11 – Tempos de descarga e carga nos tanques | 59 |
| Quadro 12 – Tempos de imersão e escorrimento nos tanques | 60 |
| Quadro 13 – Velocidades das pontes rolantes | 61 |
| Quadro 14 – Velocidades dos tratores e transportadores | 61 |
| Quadro 15 – Tempos de ciclo médio das estações de trabalho | 72 |
| Quadro 16 – Ocupação de estufas, resfriadores e buffers | 72 |
| Quadro 17 – Indicadores de entrada, saída e ocupação dos tanques | 73 |
| Quadro 18 – Tempo excedido médio nos tanques..... | 73 |
| Quadro 19 – Quantidades processadas e em processo | 74 |
| Quadro 20 – Tempos de ciclo..... | 74 |
| Quadro 21 – Resultados gerais do processo | 74 |
| Quadro 22 – Comparação de resultados dos modelos de simulação..... | 75 |
| Quadro 23 – Resultados de tempo de ciclo de chassis | 85 |
| Quadro 24 – Mudanças determinantes para redução do tempo de ciclo | 88 |
| Quadro 25 – Valores de investimento das mudanças propostas..... | 89 |
| Quadro 26 – Valores de investimento para os modelos simulados | 90 |
| Quadro 27 – Melhores investimentos..... | 91 |
| Quadro 28 – Comparação entre as mudanças propostas antes e depois da simulação..... | 93 |
| Quadro 29 – Análise de capacidade e demanda | 103 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO | 13 |
| 1.2 TEMA E JUSTIFICATIVA | 14 |
| 1.3 OBJETIVOS | 15 |
| 1.3.1 Objetivo geral..... | 15 |
| 1.3.2 Objetivos específicos..... | 15 |
| 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO | 16 |
| 1.5 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO | 16 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 2.1 SISTEMAS DE PRODUÇÃO | 17 |
| 2.1.1 Classificação dos sistemas de produção..... | 18 |
| 2.1.2 Tipos de processos | 18 |
| 2.2 PROCESSOS DE PINTURA INDUSTRIAL | 21 |
| 2.2.1 Jateamento por granalha | 21 |
| 2.2.2 Pré-tratamento..... | 22 |
| 2.2.3 Pintura e-coat | 27 |
| 2.2.4 Pintura top-coat..... | 29 |
| 2.2.5 Estufagem | 30 |
| 2.3 GERENCIAMENTO ALIADO A MODELOS MATEMÁTICOS | 32 |
| 2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL..... | 34 |
| 2.4.1 Introdução | 34 |
| 2.4.2 Histórico da simulação | 36 |
| 2.4.3 Linguagens de programação | 36 |
| 2.4.4 Estado da arte em projetos de simulação | 37 |
| 2.4.5 Tipos de simulação | 37 |
| 2.4.6 Aplicações da simulação computacional | 37 |
| 2.4.7 Vantagens e riscos da simulação computacional | 39 |
| 2.4.8 Princípios do modelamento | 40 |
| 2.4.9 Ferramenta de simulação utilizada..... | 41 |
| 3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO..... | 42 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1 A EMPRESA..... | 42 |
| 3.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO ATUAL..... | 43 |
| 3.2.1 Conceituação de projeto do cliente Randon..... | 43 |
| 3.2.2 Carregamento e movimentação..... | 45 |
| 3.2.3 Layout e fluxo produtivo..... | 48 |
| 3.2.4 Logística..... | 51 |
| 3.3 ESTRUTURAÇÃO DAS ETAPAS DO TRABALHO COM BASE NA PESQUISA- AÇÃO..... | 52 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 55 |
| 4.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS | 55 |
| 4.2 ANÁLISE DO SISTEMA | 55 |
| 4.3 COLETA DE DADOS | 55 |
| 4.3.1 Tipos de produtos | 55 |
| 4.3.2 Fluxos de processo | 56 |
| 4.3.3 Mix de produtos | 57 |
| 4.3.4 Tempos de processo | 58 |
| 4.3.5 Transportadores | 60 |
| 4.4 CRIAÇÃO DO MODELO | 62 |
| 4.4.1 Estratégias de representação dos elementos do processo produtivo..... | 63 |
| 4.4.2 Estratégias de movimentação dos objetos de fluxo de material | 66 |
| 4.4.3 Estratégias dos tempos de processamento..... | 67 |
| 4.4.4 Estratégias de utilização dos <i>buffers</i> de processo | 67 |
| 4.4.5 Estratégias de coleta de estatísticas..... | 68 |
| 4.4.6 Indicadores | 68 |
| 4.5 VALIDAÇÃO DO MODELO | 71 |
| 4.5.1 Tempos de estações de trabalho | 72 |
| 4.5.2 Ocupação de estufas, resfriadores e <i>buffers</i>..... | 72 |
| 4.5.3 Indicadores da área dos tanques | 73 |
| 4.5.4 Indicadores gerais do processo | 73 |
| 4.5.5 Conclusões de validação | 74 |
| 4.6 EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE DO MODELO | 75 |
| 4.6.1 Mudanças implementadas | 76 |
| 4.7 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS | 77 |
| 4.8 RESULTADOS FINAIS E RECOMENDAÇÕES | 88 |

| | |
|---|------------|
| CONCLUSÃO..... | 92 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 94 |
| APÊNDICE A – LAYOUTS | 97 |
| APÊNDICE B – PLANILHA DE RESULTADOS DE SIMULAÇÃO | 99 |
| APÊNDICE C – ARTIGO DISSERTAÇÃO | 100 |
| APÊNDICE D – ARTIGO INCERTEZAS DE MEDIÇÃO..... | 114 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Haja vista a atual dinâmica do mercado e a constante necessidade das empresas manterem e conquistarem novos clientes, torna-se fundamental o movimento de operacionalizar, com a maior eficiência possível, as decisões estruturadas no âmbito estratégico e tático. Para isso, é fundamental que as organizações conheçam profundamente seus processos produtivos, e atuem preventivamente em relação aos cenários futuros que lhe são apresentados.

Surge uma necessidade de compreensão dinâmica dos processos de produção, visando uma melhoria contínua e assertiva dos mesmos. Para tal, algumas ferramentas importantes são apresentadas, tais como: técnicas de produção enxuta, mapeamento do fluxo de valor, e a simulação computacional dentro da pesquisa operacional (CASSEL, 1996).

Uma maior disponibilidade de informações acerca dos processos industriais, promovida pela evolução da tecnologia de informação, proporcionou o estudo desta base de dados por meio de ferramentas de simulação quantitativa. Sendo que, com a evolução dos computadores e da animação, a simulação difundiu-se como ferramenta de tomada de decisão nas empresas (WOLFF, 2003). Além da utilização como recurso para análise de problemas na produção, a simulação passou a ser utilizada também nas fases de projeto de fábrica. E, com o aumento das opções de programas computacionais, uma melhor animação e ambientes mais amigáveis, a simulação difundiu-se em muitas organizações (CASTILHO, 2004).

Neste contexto, o presente trabalho visa estudar e aplicar a simulação computacional em uma fábrica de pinturas automotivas com o intuito de identificar restrições e gargalos, e apresentar possíveis propostas de modificações, visando, principalmente, o aumento da capacidade produtiva. Em tempo, dar-se-á a análise destas modificações no sistema considerando opções que possam gerar melhorias no processo e atender um novo patamar de demanda.

1.2 TEMA E JUSTIFICATIVA

Essa dissertação trata da simulação computacional aplicada ao ambiente da fábrica em uma empresa de pinturas automotivas, visando analisar propostas de modificação futura na fábrica, para o atendimento de um novo patamar de demanda de produção.

Esta proposta é justificada pela crescente necessidade de uma análise estruturada do processo produtivo por meio de métodos científicos, e não apenas do conhecimento explícito dos gestores da empresa, visando a rapidez e o embasamento sólido para a tomada de decisões perante diferentes cenários de mercado.

Para Bangsow (2010), os propósitos da simulação variam entre os níveis táticos e operacionais. Em um ponto de vista estratégico, usuários podem solucionar problemas relacionados à: condições logísticas, instalação de fábricas em diferentes países, eficiência de mão de obra, custos de estocagem, entre outros. Já em um nível operacional, podem-se resolver problemas relacionados à: tamanho de lotes de fabricação, sequência de ordens de produção, recursos necessários, entre outros. Contudo, em ambos os casos, a simulação é utilizada para a tomada de decisão sobre sistemas produtivos novos ou já existentes.

Neste contexto, buscam-se respostas para comprovar, antes da aprovação do investimento, que as modificações propostas no sistema de produção estudado irão atender o aumento de demanda proposto. Esta análise auxiliará, ainda, no processo de aprimoramento das ideias relacionadas a quais são as melhores alternativas de modificação do processo produtivo.

Portanto, esse trabalho investiga como a simulação computacional pode ser utilizada como ferramenta para auxiliar na tomada de decisão no planejamento de uma modificação em um processo produtivo de pinturas automotivas.

O quadro 1 apresenta uma análise em relação à capacidade atual do sistema de produção estudado e as demandas atual e futura, sendo que é verificado um déficit de 18% de capacidade produtiva para atendimento da demanda projetada. Os dados de capacidade são apresentados pela unidade produtiva denominada “barras de carga”, sendo este o pacote de trabalho, ou unidade de produção, que é movimentado ao longo do sistema. A demanda atual é condizente à quantidade média diária de barras de carga necessárias para produção do volume registrado em 2012, sendo que a demanda futura representa a média diária de barras de carga necessárias para o atendimento da demanda prevista para 2015.

Quadro 1 – Análise de capacidade e demanda

| Cenário de Demanda | Demanda (Barras de Carga) | Capacidade (Barras de Carga) | Utilização (%) | Faixa de Capacidade Disponível (%) |
|--------------------|---------------------------|------------------------------|----------------|------------------------------------|
| Atual | 70 | 110 | 64 | +36 |
| Futura | 130 | 110 | 118 | -18 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2012).

Para Barronio (2000), o entendimento de qualquer mudança como uma situação de risco se deve à falta de objetivos e critérios válidos para a tomada de decisão, normalmente priorizando apenas a velocidade de reação.

O processo de tomada de decisão está relacionado a duas variáveis: o problema, e as possibilidades de solução. Tal problema pode ser solucionado pela experiência do tomador de decisão e por meio de modelos matemáticos. Com isso, programas computacionais se apresentam possibilitando um aumento do potencial destes modelos matemáticos.

O presente trabalho visa a utilização de simulação computacional como ferramenta de apoio às decisões no processo produtivo em questão.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Estudar um sistema de pinturas automotivas através de um modelo de simulação computacional para auxiliar na tomada de decisão e no planejamento de melhorias gerenciais.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são apresentados a seguir:

- a) Estruturar o modelo do processo produtivo identificando o fluxo de produção;
- b) Identificar as etapas necessárias para a simulação computacional;
- c) Aplicar o modelo de simulação utilizando o *software Tecnomatix Plant Simulation* em um processo de produção envolvendo pinturas automotivas e validar sua aplicação;

- d) Propor modificações no sistema produtivo para aumento da capacidade e testá-las através da simulação computacional;
- e) Avaliar os resultados obtidos e definir a solução para o aumento de capacidade; e
- f) Fomentar a aplicação da simulação computacional no processo decisório.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo que no primeiro é apresentada uma introdução, justificativa e objetivos da utilização da simulação computacional em uma empresa de pinturas automotivas.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica acerca da simulação computacional, sistemas de produção e processo de pintura.

O terceiro capítulo trata sobre o desenvolvimento do trabalho, a empresa e a descrição do processo atual, expondo, ainda, uma proposta de abordagem e um cronograma de trabalho.

O quarto capítulo apresenta os resultados e discussão, e o quinto capítulo a conclusão do trabalho.

1.5 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho delimita-se na aplicação da simulação computacional apenas para o principal fluxo produtivo da empresa, entendendo que este fluxo atua como principal determinante da capacidade global do sistema, e não sofre influências de agentes periféricos ao mesmo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica são abordados os tópicos fundamentais para a estruturação deste trabalho, sendo apresentados fundamentos de sistemas de produção, processos de pintura industrial, gerenciamento aliado a modelos matemáticos, e simulação computacional.

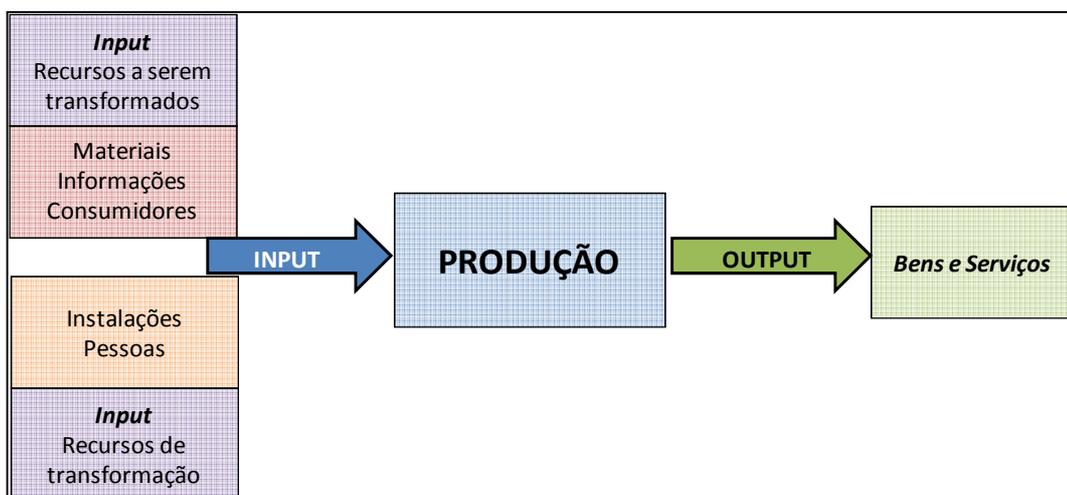
2.1 SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Com a revolução industrial, iniciou-se a aplicação de sistemas de produção na organização do trabalho. Até então, a simples divisão das tarefas no trabalho ditava a fabricação dos produtos, considerando funções especializadas realizadas nas casas dos trabalhadores. Considerada como um sistema, a produção consiste de um conjunto de recursos humanos, físicos, tecnológicos, e de informações, que visa à transformação de entradas em saídas, podendo produzir tanto bens como serviços (SPRAKEL e SEVERIANO FILHO, 1999).

Para Landmann (2005), quanto mais eficiente for feita a conversão de entradas em saídas, mais produtivo é o sistema. Heizer e Render (2001) expõem que a produtividade é medida pela razão entre as saídas (bens e serviços) e as entradas (recursos).

A produção visa obter a máxima saída considerando um conjunto de recursos ou insumos e um estado de tecnologia (OISHI, 1995). A figura 1 apresenta uma visualização esquemática da função de produção.

Figura 1 – A função de produção



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

Machline (1994) aborda que a melhoria da qualidade, a redução de custos, o aumento da produtividade, e a diminuição do prazo de entrega, são algumas das grandes preocupações na administração da produção, buscando o melhor aproveitamento dos recursos produtivos, agregando valor, e garantindo o lucro sobre o investimento.

Stevenson (2001) expõe que a principal função da produção é agregar valor ao longo do processo de transformação. Slack et al. (2002) abordam cinco objetivos que correspondem a vantagens competitivas, sendo eles: qualidade, rapidez, confiabilidade, custo e flexibilidade.

O conhecimento profundo, por parte da empresa, do meio em que está inserida, das variáveis que a afetam, de suas limitações, bem como de seu modelo de produção, são de suma importância para planejar e controlar seu sistema produtivo.

2.1.1 Classificação dos sistemas de produção

Tubino (1997) apresenta uma classificação dos sistemas de produção em três formas: pelo grau de padronização dos produtos, pelo tipo de operações, e pela natureza do produto.

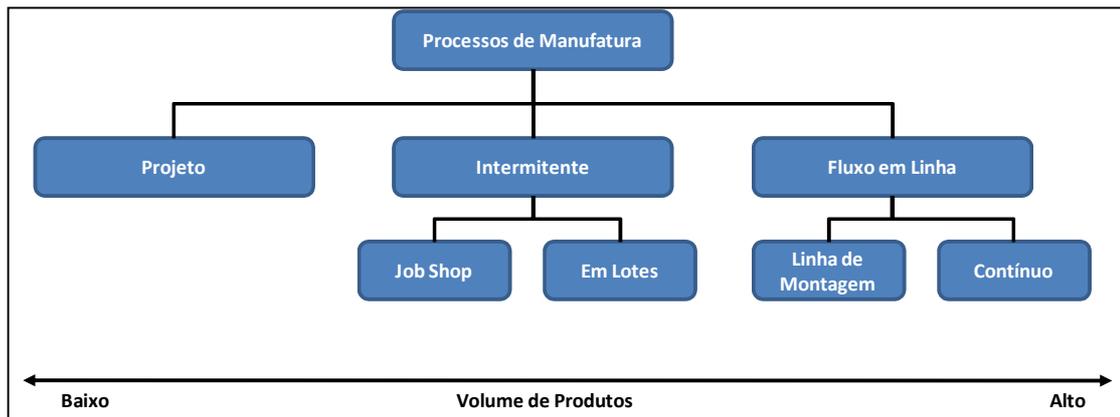
- a) Pelo grau de padronização dos produtos: classificados como sistemas produtivos de produtos padronizados e sistemas produtivos de produtos sob medida.
- b) Pelo tipo de operações: classificados em sistemas de processos contínuos e sistemas de processos discretos, sendo associado com o grau de padronização dos produtos e o volume de produção dos mesmos.
- c) Pela natureza do produto: classificados em sistemas de produção de bens ou de serviços, sendo o primeiro orientado para o produto e o segundo para a ação.

A classificação apresentada por Tubino (1997) é uma das possibilidades de abordagem, contudo outros autores apresentam maneiras diferentes de classificação.

2.1.2 Tipos de processos

Uma das opções de classificação dos sistemas de produção é conforme o tipo de operações que sofrem os produtos (TUBINO, 1999). O volume de produção e o grau de padronização dos produtos são variáveis de classificação dos processos de produção, sendo que a figura 2 apresenta os tipos de processos produtivos relacionados com a variável de volume de produção (FESPPR, 2009).

Figura 2 – Tipos de processo produtivo



Fonte: FESPPR (2009).

Tubino (1999) divide os processos em duas categorias: contínuos e discretos. Os contínuos são aqueles em que a produção de bens ou serviços gera saídas que não podem ser identificadas individualmente; já os processos discretos são aqueles em que as saídas podem ser isoladas em unidades ou lotes, particularizando uns dos outros. Os processos discretos podem, ainda, ser subdivididos em: repetitivos em massa, repetitivos em lotes, e por projeto.

Os processos contínuos são inflexíveis e empregados em sistemas de alta uniformidade de produção e demanda, onde a utilização da automatização é favorecida. Elevados investimentos em instalações e equipamentos são necessários, e a mão de obra é utilizada principalmente para manutenção e condução das instalações, tornando seu custo de baixa representatividade em relação a outras variáveis de produção. A produção de energia elétrica e petróleo são exemplos de produção contínua (TUBINO, 1997).

Os processos discretos repetitivos em massa são utilizados para produtos padronizados e de grande escala. Possuem uma estrutura de produção também padronizada, em que altos investimentos podem ser amortizados no longo prazo, isso em decorrência da estabilidade de demanda dos produtos, possibilitando poucas alterações de projeto no curto prazo. Stevenson (2001) denomina estes processos de semi-contínuos, sendo empregados na produção em larga escala de produtos padronizados, utilizando, muitas vezes, componentes padrão com diferenciação apenas na linha de montagem final. Como exemplos de processos repetitivos em massa, ou semi-contínuos, são verificados: a produção de automóveis, os abatedouros de gado e, no âmbito dos serviços, o transporte aéreo (TUBINO, 1999).

Processos discretos repetitivos em lotes apresentam um volume de produção padronizada dividida em lotes, cada um deles com características específicas, sendo que cada um deles segue um conjunto de operações que são programadas à medida que as operações

predecessoras são atualizadas. Como exemplo deste tipo de processo está a produção em baixa escala de produtos têxteis, ferragens e sapatos (TUBINO, 1999).

Os processos discretos por projeto buscam o atendimento de uma necessidade específica, sendo um empreendimento que têm data de conclusão, necessita de flexibilidade dos recursos produtivos, e onde a ociosidade é comum. A construção de usinas hidrelétricas e navios são exemplos deste processo por projeto (TUBINO, 1999).

As principais características dos processos segundo a classificação de Tubino (1999) são apresentadas no quadro 2.

Quadro 2 – Características dos sistemas de operação por tipo de operação

| | Contínuo | Repetitivo em Massa | Repetitivo em Lotes | Projeto |
|-----------------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------|
| Volume de Produção | Alto | Alto | Médio | Baixo |
| Variedade de Produtos | Pequena | Média | Grande | Pequena |
| Flexibilidade | Baixa | Média | Alta | Alta |
| Qualificação da MOD | Baixa | Média | Alta | Alta |
| Layout | Por produto | Por Produto | Por processo | Por processo |
| Capacidade Ociosa | Baixa | Baixa | Média | Alta |
| Lead Times | Baixo | Baixo | Médio | Alto |
| Fluxo de Informações | Baixo | Médio | Alto | Alto |
| Produtos | Contínuos | Em lotes | Em lotes | Unitário |

Fonte: Tubino (1997).

Gaither e Frazier (2002) expõem que a produção focada no produto pode ser denominada linha de produção, linha de montagem ou produção contínua, podendo ser aplicada a duas formas de produção: manufatura discreta e manufatura por processo. A discreta trata da manufatura de produtos distintos, enquanto na manufatura por processo os fluxos de materiais movem-se entre as operações de produção. A produção focada no produto apresenta características tais como: alto volume de produção, baixo custo unitário e facilidade no planejamento e controle de produção.

Ainda para Gaither e Frazier (2002), a produção focada no processo pode ser chamada também de intermitente, pois a produção possui uma base *start-and-stop* (iniciar e parar), ou seja, de forma intermitente. Este sistema pode ser chamado, ainda, de *job shop* (oficina), haja vista que os produtos se movem de departamento em departamento, em lotes normalmente conforme pedidos dos clientes. Dentro deste grupo está uma subdivisão específica denominada *flow shop*, sendo caracterizada por possibilitar diferentes fluxos de ordens entre as máquinas e com operações ordenadas, possuindo uma direção uniforme para todos os movimentos (PACHECO e SANTORO, 1999).

Para Corrêa e Corrêa (2005), os processos produtivos podem ser divididos em quatro grupos: por tarefa (*job shop*), em lotes (*batch*), em linha, e com fluxo contínuo. O processo por tarefa trata da produção de pequenos lotes, com uma grande variedade de produtos e com diferentes roteiros de fabricação. O processo em lote é similar ao processo por tarefa, contudo existe a especialização e dedicação dos funcionários. A produção em linha dá-se em peças (unidades), através de estações de trabalho conexas, e em uma taxa pré-estabelecida. Já o fluxo contínuo caracteriza-se pelo fluxo contínuo de materiais.

O processo estudado no presente trabalho apresenta um fluxo intermitente e do tipo *flow shop*.

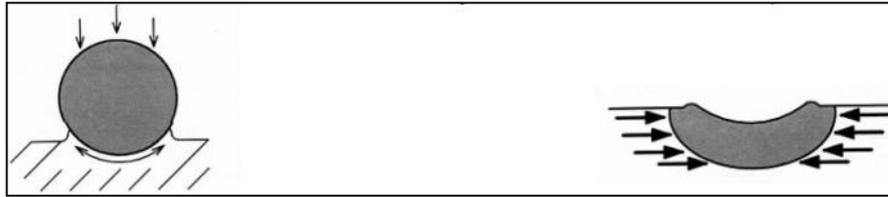
2.2 PROCESSOS DE PINTURA INDUSTRIAL

Haja vista os processos produtivos relacionados à empresa estudada, dar-se-á uma explanação conceitual acerca dos mesmos.

2.2.1 Jateamento por granalha

O jateamento com granalha é um tratamento superficial mecânico e a frio em peças metálicas, sendo obtido por meio do impacto, distribuído de forma uniforme, com partículas específicas como: esferas metálicas, cerâmicas, ou vidro. As mesmas são aceleradas por meio de um jato de ar comprimido ou por rotação com velocidade controlada (SERIZAWA e GALLEGOS, 2005). Uma exemplificação da ação da granalha de aço esférica é apresentada na figura 3.

Figura 3 – Ponto de impacto e zona comprimida por ação da granalha



Fonte: Utech, 2002.

Para Gonzales et al. (2006), o processo de jateamento com granalha dá-se quando a superfície de uma peça é submetida ao impacto de granalhas com alta velocidade, impelidas por rotação (turbinas) ou ar a alta pressão, gerando deformações plásticas e tensões residuais de compressão na superfície da peça jateada.

A figura 4 apresenta um exemplo de máquina de jateamento que utiliza granalha esférica e turbinas automáticas para impelir a granalha. Nessa figura é observado um chassi entrando na máquina de jateamento.

Figura 4 – Exemplo de máquina de jateamento



Fonte: Do autor, 2012.

Utech (2002) expõe que o jateamento melhora: a adesão do filme de tinta, a resistência à corrosão, e a aparência; sendo que peças fabricadas com chapas laminadas à quente devem ser jateadas antes do pré-tratamento químico, visando a remoção mecânica das carepas provenientes da laminação.

2.2.2 Pré-tratamento

Antes da aplicação do filme de tinta, a maioria das peças metálicas recebe em sua superfície um pré-tratamento que envolve uma camada de conversão. O propósito da mesma

consiste na limpeza do metal, na promoção da aderência da pintura, no aumento da resistência à corrosão, e no aumento da resistência ao empolamento (ELECTROCOATING, 2002).

As etapas básicas de um típico processo de pré-tratamento químico são apresentadas na figura 5.

Figura 5 – Fluxograma básico das etapas de pré-tratamento



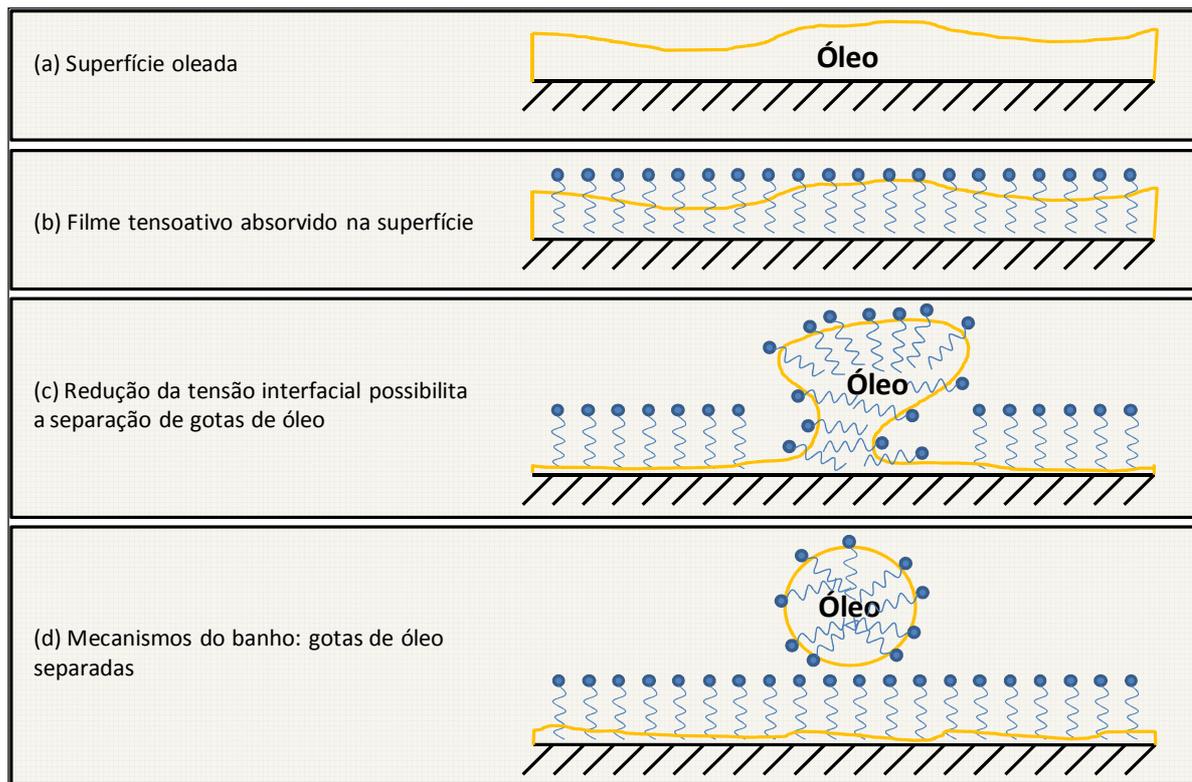
Fonte: Electrocoating, 2002.

O desengraxe é um dos primeiros processos do pré-tratamento. A limpeza da superfície afeta todos os processos subsequentes, sendo considerado um dos estágios mais importantes na preparação para a pintura (UTECH, 2002).

O processo de desengraxe é executado, na maioria dos casos, por meio de desengraxantes químicos em solução aquosa. Sua aplicação pode ocorrer através de spray ou por imersão. O processo por spray, além da ação química, oferece uma ação mecânica derivada da pressão impelida pelos bicos de spray. Contudo, este processo demanda bombas e tubulações de maior porte, assim como impõe maior complexidade para o içamento das peças, e demanda maiores capacidades caloríficas das instalações industriais. O processo por imersão oferece uma maior capacidade de atingir regiões internas das peças, de difícil acesso. As instalações de bombeamento são mais simples e as demandas térmicas são menores em comparação com o processo por spray. Entretanto, é necessário um tanque com um volume superior de líquido (uma vez que as peças precisam estar completamente submersas), e a ação mecânica praticamente inexistente (ELECTROCOATING, 2002).

Streitberger e Dössel (2008) expõem que os desengraxantes possuem partículas tensoativas que, uma vez absorvidas pelo óleo na superfície das peças, agem de maneira a reduzir as tensões de ligação do óleo com a peça, separando e removendo gotas contendo este óleo. A figura 6 ilustra este mecanismo de remoção de óleo da superfície.

Figura 6 – Mecanismo do processo de desengraxe químico

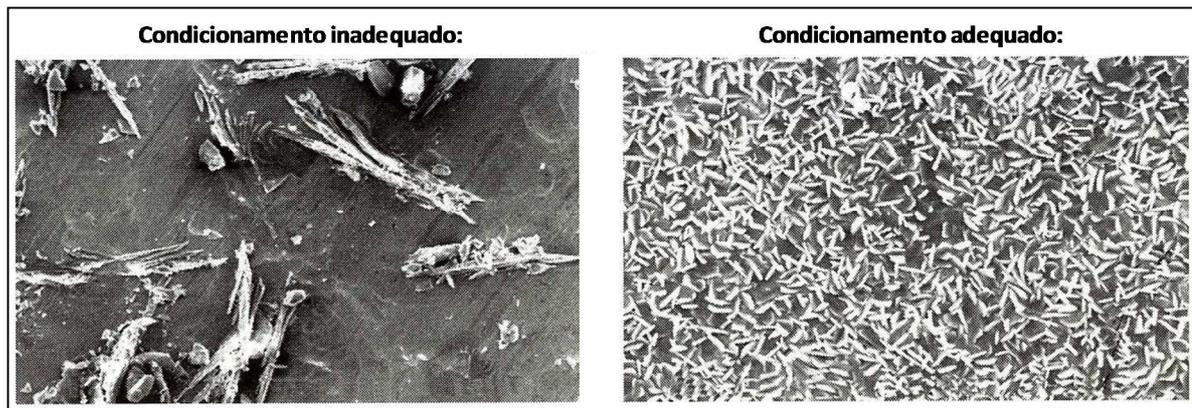


Fonte: Streitberger e Dössel, 2008.

Para Roobol (2005), os estágios de enxágue são responsáveis pela eliminação do arraste de produtos químicos provenientes dos processos predecessores. No caso do enxágue após o desengraxe, sua importância está relacionada, por exemplo, ao fato de que os resíduos alcalinos, provenientes do enxágue, podem neutralizar os reagentes ácidos de conversão da fosfatização (processo subsequente).

Os estágios de condicionamento possuem sais de titânio no estado coloidal. Estas partículas coloidais, por suas características anódicas, são atraídas eletrostaticamente para as áreas catódicas do metal base, gerando núcleos e criando áreas onde a peça é ativada, auxiliando com a formação de cristais que garantem a uniformidade da camada de fosfato (ELECTROCOATING, 2002). A figura 7 apresenta um exemplo da morfologia do cristal que é desenvolvida em uma fosfatização de zinco com aplicação por spray, e com um condicionamento adequado e inadequado.

Figura 7 – Fotos microscópicas de um processo de fosfatização adequado e inadequado



Fonte: Electrocoating, 2002.

A fosfatização consiste em uma etapa de deposição de uma camada inorgânica sobre o metal base; sendo uma solução ácida concentrada, comumente composta de fosfatos metálicos (Zn, Ni, Mn, Fe, Ca,...), ácido fosfórico, agentes oxidantes e aditivos fluorados. O objetivo é a adição de uma camada microcristalina que visa aumentar a resistência dos revestimentos, como, por exemplo, a tinta eletrodepositada (ELECTROCOATING, 2002).

Por sua ligação iônica e estrutura porosa, a fosfatização melhora a aderência do filme de tinta, e, ainda, atua evitando a corrosão no metal caso o filme de tinta seja danificado (Roobol, 2003).

Os processos mais utilizados são os de fosfato de ferro e fosfato de zinco. Contudo, vêm surgindo um terceiro tipo de fosfato, denominado comercialmente de nanocerâmico, composto basicamente de zircônio em baixas concentrações, e que atua de maneira a conectar-se ao metal base (STREITBERGER E DÖSSEL, 2008).

O estágio de passivação (com base em ácido crômico) pode ser posicionado após a fosfatização, contudo o mesmo não é obrigatório. Seu objetivo é aumentar a resistência à corrosão e umidade. Por fim, é disposto um enxágue com água ionizada (isenta de sais minerais) que visa remover todos os contaminantes na superfície do metal (ELECTROCOATING, 2002).

O quadro 3 apresenta um comparativo entre o fosfato de ferro, o fosfato de zinco e o nanocerâmico.

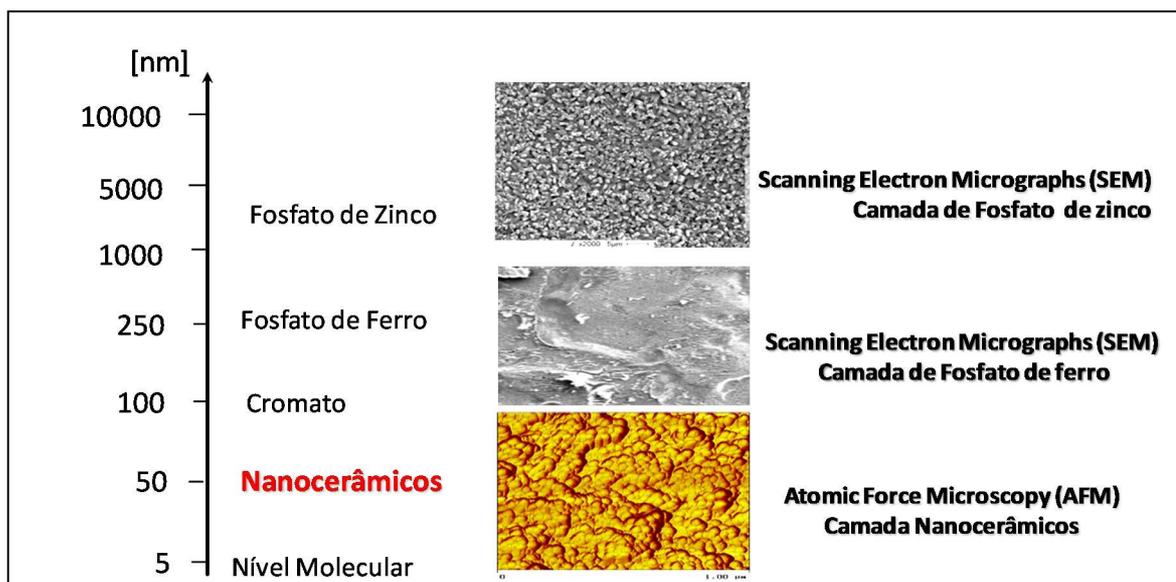
Quadro 3 – Comparativo entre fosfato de ferro, o fosfato de zinco e o nanocerâmico

| | Fosfato de Ferro | Fosfato de Zinco | Nanocerâmicos |
|---|---|--|--|
| 1 | Tecnologia de conversão gerando uma camada amorfa | Ocorre deposição química formando uma camada microcristalina de cristais | Tecnologia de conversão gerando uma camada amorfa |
| 2 | Formação de borra 1,0-2,0 g/m ² | Formação de borra 8 - 12 g/m ² | Baixa geração de borra 0,1 g/m ² |
| 3 | Controle analítico fácil | Controle analítico complexo | Controle analítico fácil |
| 4 | Pior desempenho em testes anti-corrosivos | Melhor desempenho em testes anti-corrosivos | Intermediário desempenho em testes anti-corrosivos |
| 5 | Baixo custo com tratamento efluentes | Alto custo com tratamento efluentes | Baixo custo com tratamento efluentes |
| 6 | Opera temperatura ambiente | Opera temperatura 50-55°C | Opera temperatura ambiente |
| 7 | Passível de alta contaminação nos estágios subsequentes devido a alta carga de ferro nos enxágues | Passível de alta contaminação nos estágios subsequentes devido a alta carga a alta carga de metais como (níquel, zinco e manganês) | Nível de contaminação muito baixo quando comparado com as outras tecnologias |
| 8 | Baixa geração de resíduos classe I | Alta geração de resíduos classe I | Baixa geração de resíduos classe I |
| 9 | Contém metais pesados | Contém metais pesados | Isento metais pesados |

Fonte: Adaptado de Electrocoating, 2002.

A figura 8 apresenta, ainda, uma escala comparativa entre os 3 tipos de fosfato supracitados. A escala apresentada é em nanômetros, sendo que a nomenclatura utilizada como Nanocerâmicos trata do tipo de fosfato que atua em níveis mais próximos do molecular.

Figura 8 – Escala das camadas de fosfato.



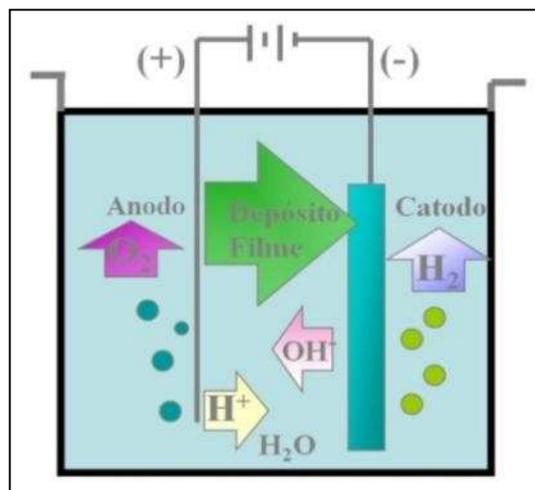
Fonte: PPG, 2011.

2.2.3 Pintura *e-coat*

A pintura *e-coat*, também conhecida como *electrocoating*, elpo, KTL, entre outros, é um processo que ocorre por uma diferença de potencial elétrico entre a peça e o banho de pintura, sendo que ocorre a migração das partículas de tinta para a superfície a ser recoberta (STREITBERGER e DÖSSEL, 2008).

O processo de pintura *e-coat* teve sua utilização difundida a partir da década de 1960, como *primer* (pintura de base) aplicado à carroceria dos automóveis. Atualmente, mais de 98% dos carros são produzidos com pintura *e-coat* como *primer*, sendo que sua utilização vem aumentando em outros tipos de peças, tais como: equipamentos domésticos, mobília e construção, implementos agrícolas, implementos rodoviários, equipamentos térmicos, entre outros (ELECTROCOATING, 2002). A figura 9 apresenta um esquema de como ocorre a eletrodeposição catódica.

Figura 9 – Eletrodeposição catódica



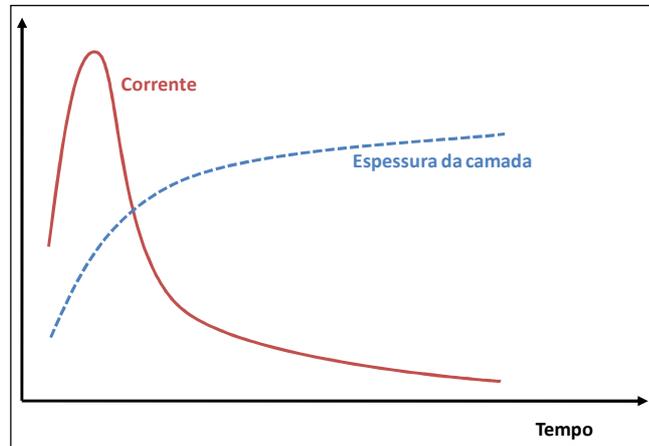
Fonte: Electrocoating, 2002.

Considerando o processo de eletrodeposição catódica, a peça recebe cargas negativas e, uma vez que as partículas sólidas em suspensão no banho são mantidas com cargas positivas, ocorre a atração destas partículas pela peça, sendo que este processo só é encerrado quando a superfície metálica da peça estiver isolada eletricamente, ou seja, quando toda a superfície estiver coberta com o filme de tinta (ROOBOL, 2003).

O aumento da corrente elétrica está relacionado com o aumento da concentração de íons, até um ponto máximo, e o declínio da corrente está relacionado à resistividade do filme de tinta que se deposita na superfície da peça (STREITBERGER e DÖSSEL, 2008). A figura 10

apresenta a curva da corrente elétrica em função do tempo e sua relação com a espessura do filme de tinta.

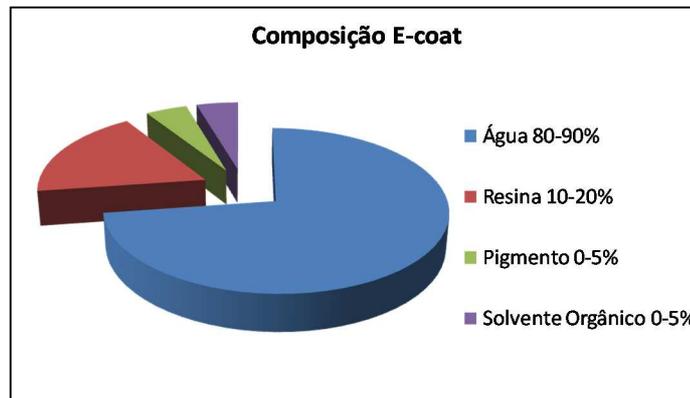
Figura 10 – Relação corrente elétrica e espessura de camada



Fonte: Streitberger e Dössel, 2008.

A figura 11 mostra a composição do banho de *e-coat*, sendo o mesmo constituído basicamente de: água, resina polimérica, pigmento, e solventes orgânicos.

Figura 11 – Composição do banho de *e-coat*



Fonte: Electrocoating, 2002.

Dentre os benefícios da pintura *e-coat* podem ser observados: *otimização de custos*, haja vista a eficiência de transferência da tinta para a peça acima de 95% e a baixa quantidade de mão de obra requerida; *produtividade*, considerando a viabilidade de alta densidade de peças no pacote de trabalho e possibilidade de velocidades maiores de linha; *meio ambiente*, haja vista a isenção de metais pesados, a alta taxa de aproveitamento de tinta, baixo nível de geração de resíduos e baixos riscos de incêndio (ELECTROCOATING, 2002).

2.2.4 Pintura *top-coat*

Como estágio subsequente ao *e-coat*, pode ser aplicado o *top-coat* (pintura de acabamento). Esta pintura pode ser executada com tinta pó ou tinta líquida, por meio de sistemas de aplicação manuais ou automáticos. A figura 12 apresenta um exemplo de pintura *top-coat* a pó com aplicadores manuais e automáticos.

Figura 12 – Exemplo de sistema de pintura *top-coat* pó



Fonte: Do autor, 2012.

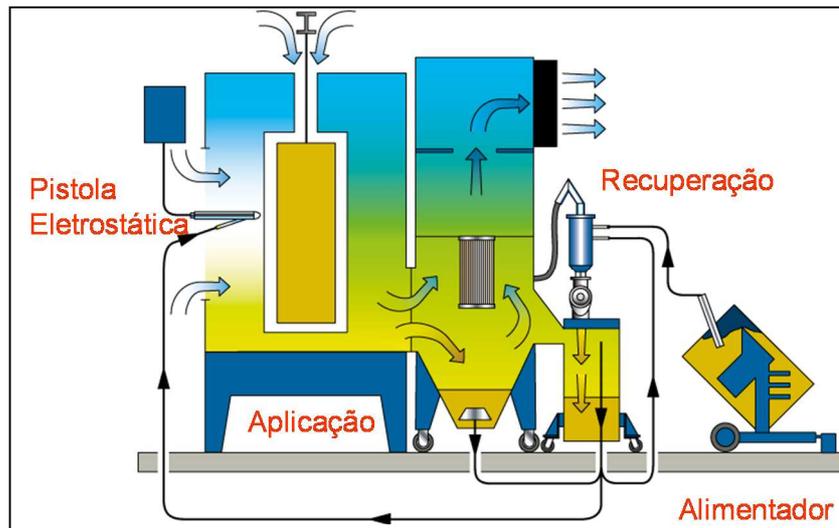
A pintura pó envolve a aplicação de pequenas partículas de resina e pigmento (pó), na superfície de um substrato, submetendo este pó ao calor para que derreta e funda-se na superfície da peça, criando uma pintura contínua e uniforme. A pintura pó oferece excelente resistência à corrosão, impacto e abrasão, assim como retenção de brilho (UTECH, 2002).

Ainda para Utech (2002), os custos relacionados ao treinamento de mão de obra, manuseio e estocagem são reduzidos, se comparados com a pintura líquida. Considerando, ainda, que a pintura pó apresenta uma eficiência de aplicação de 90 a 95%, também se verificam vantagens em relação a muitos processos de pintura líquida por spray.

Os processos de pintura pó são geralmente executados por meio de aplicação eletrostática, sendo que o pó passa por um sistema que o carrega eletrostaticamente com cargas positivas e negativas. Uma vez que a peça a ser pintada encontra-se aterrada, ocorre a atração das partículas para a superfície da peça (ROOBOL, 2003).

A figura 13 apresenta um esquema de um equipamento de aplicação de pintura pó. Nele pode ser visto onde ocorre a aplicação do pó por meio da pistola eletrostática, assim como o fluxo de recuperação do pó que não é aderido à peça pintada. Esse pó retorna à pistola e é complementado com uma alimentação externa paralela.

Figura 13 – Esquema de um equipamento de aplicação de pintura pó



Fonte: Utech (2002).

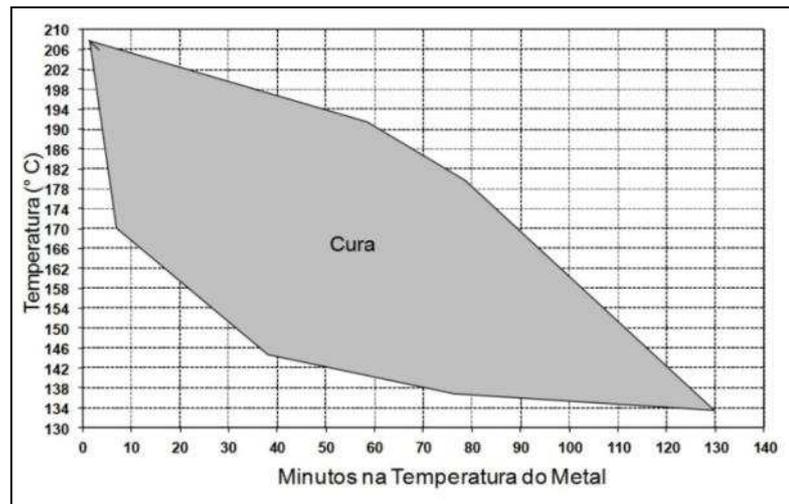
2.2.5 Estufagem

A reação de fusão do pó é iniciada em fornos de cura denominados de estufas. Estas estufas são responsáveis por produzir e manter o calor necessário para a reação química da pintura pó. As peças devem ser expostas ao calor para que a camada de pó, que reage na superfície das peças, alcance as propriedades especificadas. A quantidade exata de calor e o tempo de permanência da peça na estufa propiciam a obtenção das propriedades químicas e mecânicas requeridas (ROOBOL, 2003).

A peça deve permanecer por um determinado tempo e temperatura na estufa. Este parâmetro é especificado conforme o fornecedor de matéria-prima. Uma vez que esta temperatura e tempo são excedidos, ocorre uma perda de matéria orgânica do filme de tinta aplicada, provocando maior consumo de material e aparecimento de sujidades na estufa. Uma vez que a temperatura e tempo não são atingidos, pode ocorrer o deslocamento do filme de tinta. Para medição do comportamento de cura é utilizada uma análise termográfica, que demonstra as medidas de temperatura ao longo do tempo na peça. Estas medidas são comparadas com a janela de cura especificada pelo fornecedor da matéria-prima. A figura 14

apresenta um exemplo de janela de cura. Essa janela de cura cruza valores de temperatura e tempo de permanência do metal a essa temperatura. No caso dos pontos de intersecção acontecerem dentro da área cinza, conclui-se que o processo de cura é satisfatório e atingiu as especificações da tinta aplicada.

Figura 14 – Exemplo de janela de cura



Fonte: PPG, 2011.

A figura 15 apresenta uma peça com pó depositado sendo colocada em uma estufa de cura para o processo de polimerização do pó. Nesse exemplo, o chassi permanece por 50 minutos a uma temperatura do ar dentro da estufa de 240 graus Celsius.

Figura 15 – Peça entrando em estufa de cura



Fonte: Do autor, 2012.

Para Utech (2002), existem 3 maneiras de aquecer as peças até a temperatura requerida para cura da pintura. São elas: *convecção*, onde a energia é transmitida por circulação de ar quente; *radiação*, onde a transmissão de energia ocorre diretamente entre a peça e a fonte de

energia, sem a circulação de ar; e *indução*, onde a transmissão de energia ocorre pela indução de uma corrente elétrica, aquecendo a peça.

2.3 GERENCIAMENTO ALIADO A MODELOS MATEMÁTICOS

No campo da ciência da gerência, Moreira (2001) apresenta alguns modelos de utilização mais generalizada no processo decisório:

- a) teoria dos jogos: utilizada para solucionar problemas com disputa de interesses, considerando que cada parceiro possui um portfólio de ações possíveis, considerando as regras do jogo;
- b) teoria das filas: busca a solução em condições de aglomeração e demoras em algum ponto do serviço;
- c) gráfico de Gantt: explicita graficamente o andamento real e o planejado em um projeto;
- d) CPM (*Critical Path Method*): utiliza uma abordagem determinística do tempo, sendo empregado na programação e controle de projetos complexos;
- e) PERT (*Program Evaluation and Review Technique*): utiliza uma abordagem probabilística do tempo, sendo também empregado na programação e controle de projetos complexos;
- f) previsão: não se trata especificamente de um modelo, mas do agrupamento de vários elementos, tais como: previsão de venda, previsão econômica, e previsão tecnológica. É utilizado no planejamento de produção;
- g) probabilidade (análise estatística): utilizada na análise de problemas que envolvem riscos, em que as variáveis podem assumir diferentes valores, relacionados a uma determinada distribuição de probabilidade;
- h) programação linear: utilizada na escolha de alternativas considerando a restrição de recursos, sendo um dos modelos mais utilizados em condições práticas;
- i) programação dinâmica: sua aplicação dá-se na busca de objetivo final considerando diversas faces inter-relacionadas e em que se deve adotar uma decisão coerente a cada uma destas faces; e
- j) simulação: a idéia é analisar de maneira interativa o comportamento de um modelo, buscando soluções para problemas específicos ou um melhor conhecimento das condições de operação perante uma realidade apresentada.

Moreira (2001) expõe os modelos considerando suas propriedades e aplicações, sendo ilustrado no quadro 4.

Quadro 4 – Áreas de aplicação dos modelos

| Tipo de Modelo | Área de Aplicação |
|-------------------------|---|
| Teoria dos Jogos | Análise de concorrência em mercados competitivos como disputa de clientes ou consumidores. |
| Teoria das Filas | Análise de tráfego como dimensionamento de embalagens, balanceamento de linhas de montagem, no trânsito em situações de congestionamento. |
| Gráficos de Gantt | Análise de projetos únicos, como a construção de pontes, produção de filmes e lançamento de satélites. |
| CPM | Análise de projetos de engenharia e construção. |
| PERT | Análise de projetos de engenharia e construção. |
| Previsão | Análise do potencial de desenvolvimento de mercados. |
| Probabilidade | Controle estatístico do processo e da qualidade. |
| Programação Linear | Análise de composição de produtos, planejamento agregado. |
| Programação Dinâmica | Análise econômica de máquinas e equipamentos, imóveis ou ativos da empresa. |
| Simulação Computacional | Análise de sistemas de manufatura, serviços, comunicação e transporte. |

Fonte: Moreira, 2001.

Ainda conforme Moreira (2001), o quadro 5 apresenta uma pesquisa realizada com 125 empresas dos Estados Unidos, que demonstra a aplicação e frequência da utilização destes modelos.

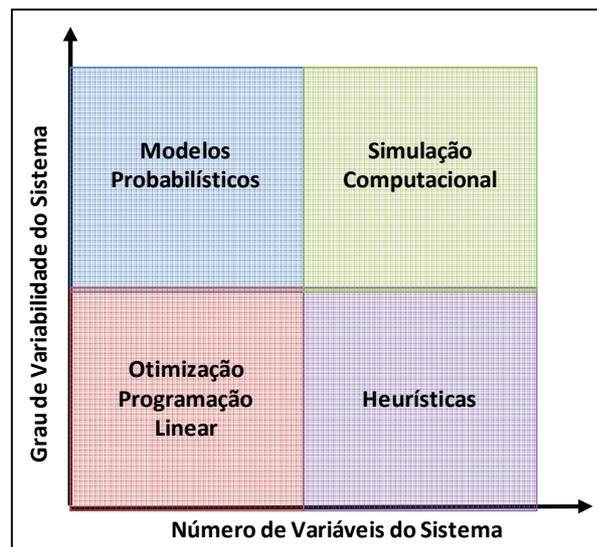
Quadro 5 – Uso dos modelos (% das organizações que responderam)

| Modelo | Nunca Utilizado | Utilização Moderada | Utilização Frequente |
|-------------------------|-----------------|---------------------|----------------------|
| Análise Estatística | 1,6 | 38,7 | 59,7 |
| Simulação Computacional | 12,9 | 53,2 | 33,9 |
| PERT/CPM | 25,8 | 53,2 | 21,0 |
| Programação Linear | 25,8 | 59,7 | 14,5 |
| Teoria das Filas | 40,3 | 50,0 | 9,7 |
| Teoria dos Jogos | 69,4 | 27,4 | 3,2 |

Fonte: Moreira, 2001.

Segundo Barronio (2000), algumas regras devem ser consideradas para a obtenção de bons resultados perante a escolha de um modelo específico. Nos sistemas com baixa variabilidade associada e poucas variáveis, são recomendados os modelos matemáticos ou de programação linear. Ainda quando a variabilidade é baixa, mas o número de variáveis é alto, a utilização de modelos heurísticos é adequada. Para sistemas com alta variabilidade, mas com baixo número de variáveis, o modelo probabilístico apresenta-se como uma boa opção. Já para sistemas com alta variabilidade (característica estocástica) e alto número de variáveis, é recomendada a utilização do método de simulação computacional. A figura 16 apresenta estes aspectos abordados para a escolha do modelo ideal.

Figura 16 – Critério de seleção do método de análise



Fonte: Barronio, 2002.

2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

2.4.1 Introdução

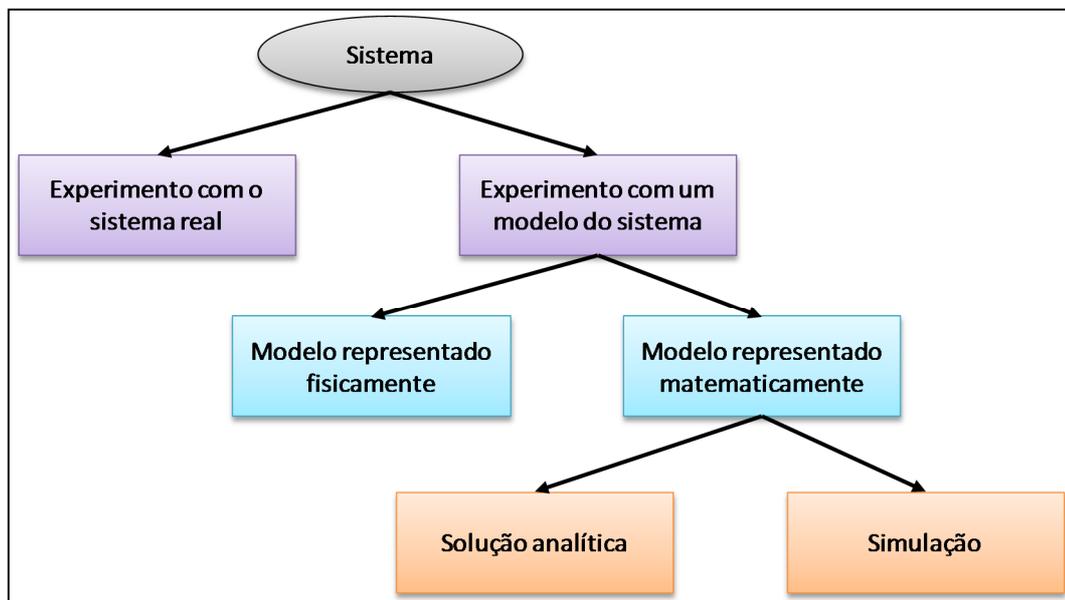
Segundo Prado (1999), a simulação consiste na compreensão das características de um sistema por meio de outro similar. A simulação utiliza um processo de experimentação visando a observação das reações às mudanças propostas, buscando o entendimento do comportamento de um sistema real perante modificações das variáveis que o estruturam (BATEMAN et al., 1999).

Prado (1999) expõe que para aumentar o desempenho de um sistema real, é utilizada a modelagem de sistema, e que esta consiste no otimizado e eficiente funcionamento em termos

de satisfação do cliente e custos. A modelagem de sistemas atua no balanceamento ideal em detrimento da grande atenção despendida no ajuste dos gargalos. Por meio da simulação, é obtida uma modelagem mais próxima do real, gerando maior confiabilidade para os processos decisórios.

Para Law (2007), em algum momento do tempo a maioria dos sistemas necessitará de conclusões e orientações acerca do relacionamento entre as diversas variáveis que o compõem, assim como será preciso prever o comportamento deste sistema perante algumas condições específicas. Posto isso, a figura 17 apresenta um mapa com diferentes caminhos em que os sistemas podem ser estudados.

Figura 17 – Maneiras para o estudo de um sistema



Fonte: Law, 2007.

Modelos matemáticos de simulação possibilitam análises de um sistema em circunstâncias específicas (COSTA, 2002). Para Castilho (2004), esta análise propicia uma verificação dos efeitos de cada decisão, aumentando o embasamento e a segurança do administrador para a solução de problemas. Sendo assim, a simulação computacional apresenta-se como uma importante ferramenta para o processo decisório, com viabilidade de aplicação em diversas áreas.

2.4.2 Histórico da simulação

Segundo Borges (2000), a origem da simulação computacional deu-se como uma extensão do Método de Monte Carlo (que surgiu durante a Segunda Guerra Mundial), buscando a solução de problemas matemáticos em que o tratamento analítico não era viável. Na década de 1950, este método foi empregado na solução de problemas probabilísticos (tratamento de filas), sendo o nascimento da Simulação de Monte Carlo.

Taveira 1997 expõe que foi nos EUA e na década de 1960 que a simulação computacional passou a ser utilizada efetivamente, sendo empregada como ferramenta de análise e planejamento militar. Haja vista o sucesso na aplicação militar, o método estendeu-se para a indústria norte-americana, a luz do desenvolvimento das linguagens de programação.

Para Castilho (2004), a utilização do método de simulação como ferramenta no processo decisório será uma ação normal, estando diretamente relacionada à evolução e ao acesso à tecnologia.

2.4.3 Linguagens de programação

Taveira (1997) expõe que, no início do uso da simulação computacional, as linguagens empregadas não eram específicas, tendo como exemplo a aplicação da linguagem FORTRAN. Este fato demandava profissionais com profundos conhecimentos em programação de computadores. Adicionalmente, as limitações destas linguagens, que demandavam altos esforços de modelamento, inviabilizavam, muitas vezes, a utilização do método.

Linguagens específicas para o método de simulação foram desenvolvidas, dentro de um processo natural de evolução. Com rotinas e funções dedicadas, tornam-se possíveis amostragens, controle do avanço do tempo, e análises estatísticas (CASTILHO, 2004).

Sendo assim, a criação de modelos de simulação computacional foi simplificada, permitindo que profissionais sem experiência em programação pudessem desenvolver modelos. Dentre outros ganhos, observa-se: a verificação dos resultados obtidos de forma gráfica, a visualização dos resultados sem necessidades de modificação do processo produtivo real, e a facilidade de treinamento das pessoas envolvidas (KOUSKOURAS e GEORGIU, 2007).

2.4.4 Estado da arte em projetos de simulação

Considerando a evolução dos pacotes de simulação computacional, o esforço e o tempo demandado para um projeto de simulação estão concentrados mais em atividades relacionadas à análise e interpretação dos resultados do que na programação especificamente. Com isso, os conhecimentos mais importantes são aqueles relacionados ao processo a ser simulado (CASTILHO, 2004).

Ainda para Castilho (2004), e também para Van Volsem et al. (2007), com o advento de tecnologias complementares, como o *Visual Interactive Simulation* (VIS), alguns elementos foram incorporados, tais como: a construção lógica, a interface gráfica de comunicação, a capacidade de animação, a flexibilidade de modelagem, o fornecimento de relatórios, e a utilização de ferramentas estatísticas. Tal tecnologia é, ainda, integrada no ambiente *Windows*.

2.4.5 Tipos de simulação

Para Taveira (1997), os modelos de simulação computacional podem ser classificados como:

- a) determinísticos ou estocásticos: os modelos determinísticos não apresentam variáveis aleatórias, ao passo que os estocásticos apresentam variáveis aleatórias;
- b) estáticos ou dinâmicos: os modelos estáticos não consideram a variável tempo, já os dinâmicos demonstram as modificações no estado do sistema ao longo do tempo; e
- c) discretos ou contínuos: nos modelos discretos a contagem de tempo ocorre em intervalos definidos, sendo que as variáveis só podem ser determinadas nos instantes de atualização da contagem de tempo. Nos modelos contínuos, a contagem do tempo é contínua, com isso as variáveis podem ser determinadas em qualquer instante de tempo.

2.4.6 Aplicações da simulação computacional

Para Bergue (2000), a utilização da simulação computacional vêm aumentando sua abrangência dentro de diversas áreas de conhecimento, sendo apresentadas abaixo algumas das áreas onde a simulação vêm sendo aplicada.

- Manufatura

Segundo Castilho (2004), diversos cenários da manufatura podem ser modelados e analisados através da simulação computacional, sendo a manufatura uma das principais áreas a alavancar o uso da simulação. Dentre as principais possibilidades de análise estão:

- a) identificação de gargalos de forma antecipada, análise da expansão ou modificação de sistemas já existentes, verificações relacionadas à mudança de layout, adição de novos produtos ou inserção de novos equipamentos;
- b) planejamento de produção, analisando os melhores fluxos produtivos; e
- c) gestão de estoques, de forma a buscar o melhor equacionamento entre a matéria-prima e sua produção.

Barronio (2000) cita um exemplo da Michelin Pneus do Brasil, fábrica de pneus, que utilizou a simulação computacional para verificar se uma nova linha de resfriamento de pneus era necessária após a prensagem. Já Profozich (1997) apresenta a utilização da simulação pela empresa construtora de aviões Boeing, que utilizou a ferramenta para analisar a produção do Boeing 777.

- Logística

A simulação computacional é utilizada na área de logística para casos como: determinação de rotas mais eficientes, análise dos recursos adequados nos centros de distribuição e coleta, ente outros. Ou seja, para administrar a estocagem e movimentação de materiais dentro da empresa, entre empresas, e até o cliente final (CASTILHO, 2004).

A UPS (*United Parcel Service*), empresa que atua no transporte de cargas, emprega a simulação computacional para estudar o carregamento e descarregamento de seus aviões no seu centro de cargas de Louisville, Estados Unidos (PROFOZICH, 1997).

- Serviços

Castilho (2004) apresenta tipos de serviços onde a simulação computacional pode ser utilizada:

- a) supermercados: verificação do número de caixas necessários em horários diversos, criação de caixas rápidos visando a diminuição do tempo de espera, introdução de leitores ópticos nos caixas considerando sua relação com os tempos de atendimento;
- b) bancos: analisar o número de caixas necessários em diversos horários de atendimento, influência dos terminais de auto-atendimento no tempo de espera dos clientes; e

- c) transportes: verificar a influência de diferentes tipos de pagamento das passagens no tamanho das filas.

- Militar

As forças armadas dos Estados Unidos vêm utilizando a simulação computacional para solucionar problemas de táticas de ataque em guerra, logística e comunicação (CASTILHO, 2004).

2.4.7 Vantagens e riscos da simulação computacional

Para Chung (2004) e Shafer e Smunt (2004), dentro do contexto de vantagens, são incluídas: a experimentação de várias hipóteses de solução em um curto espaço de tempo, a redução de requerimentos para análise, e a fácil demonstração do modelo. Já entre as desvantagens, os autores citam que a simulação não produz resultados confiáveis se a entrada de dados não possui acuracidade. O quadro 6 apresenta algumas vantagens e riscos na utilização da simulação computacional, segundo Banks (1998) e Taveira (1997).

Quadro 6 – Vantagens e riscos da simulação computacional

| | Vantagens | Riscos |
|---|---|---|
| 1 | Variáveis podem ser exploradas sem a geração de distúrbios no sistema em uso, tais como: regras de decisão, procedimentos operacionais e fluxos de informação. | Dependência da qualidade do modelo, demandando habilidade e treinamento do analista responsável. |
| 2 | Estudo da necessidade de compra ou modificação podem ser executados antes da implementação, como: sistemas de transporte, novos projetos de leiaute, e máquinas e equipamentos. | Em geral, a simulação demanda tempo de análise e possui alto custo. |
| 3 | Controle do tempo, podendo diminuir e aumentar a velocidade para verificar os resultados. | Haja vista que a simulação busca capturar a aleatoriedade de um sistema real, algumas vezes seu resultado pode ser de complexa interpretação, gerando dificuldades na distinção se um evento ocorreu pela aleatoriedade ou pelas interações entre elementos do sistema. |
| 4 | Entendimento e comprovação de como o sistema realmente funciona. | Por vezes, a geração de um alto volume de dados ou o impacto de uma animação realística, podem levar a uma falsa percepção de qualidade da simulação. |
| 5 | Redução do custo e tempo de implementação de um sistema real. | |

Fonte: Adaptado de Banks (1998) e Taveira (1997).

Dentre as principais vantagens estão a análise virtual, sem a desestabilização do sistema real para testes, e a velocidade de análise. Já um dos riscos mais importantes está relacionado à qualidade das informações utilizadas.

2.4.8 Princípios do modelamento

Banks (1998) expõe alguns princípios para o modelamento na simulação, sendo os mesmos expostos a seguir.

- **Princípio 1 de modelamento**

A concepção de um modelo de simulação demanda: conhecimento do sistema produtivo estudado, conhecimentos de engenharia industrial, e ferramentas de modelamento (*software*).

- **Princípio 2 de modelamento**

O segredo para um profissional ser um bom modelador passa pela sua habilidade de remodelar sempre que necessário, e aceitar de forma positiva este processo.

- **Princípio 3 de modelamento**

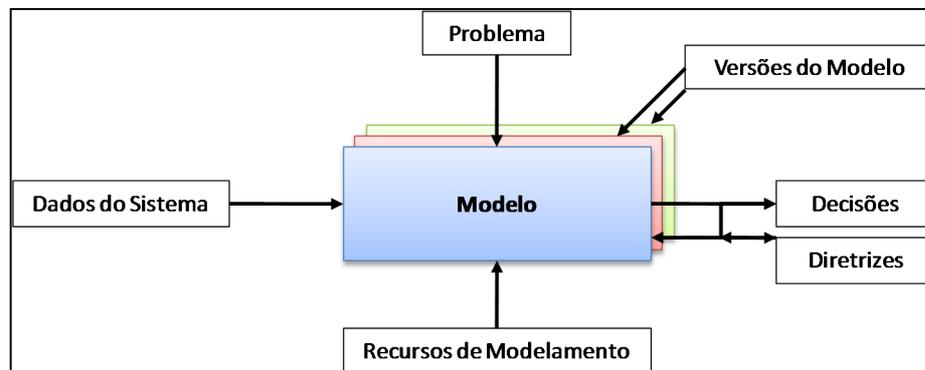
O processo de modelamento é evolucionário, porque o ato de modelamento revela importantes informações acerca de cada uma das partes do sistema.

- **Princípio 4 de modelamento**

O problema, ou sua definição, é elemento primário de controle em um modelo baseado na resolução de problemas.

A figura 18 representa um esquema do processo de modelamento baseado na resolução de problemas (BANKS, 1998).

Figura 18 – Esquema do processo de modelamento



Fonte: Banks, 1998.

2.4.9 Ferramenta de simulação utilizada

Ponderando que sistemas reais de produção possuem diversos comportamentos randômicos, tais como: disponibilidade técnica, tempos de chegada de peças para montagem, tempos de processo de atividades humanas, entre outros, os processos estocásticos têm importante relevância nos resultados da simulação. Neste contexto, o *software Plant Simulation*, da empresa Siemens, apresenta ferramentas concebidas para: análise de modelos com processos estocásticos, cálculo de distribuições em amostras, gerenciamento dos experimentos na simulação, e otimização dos parâmetros do sistema. Com uma gama de exemplos e modelamentos básicos disponíveis, o *Plant Simulation* simplifica as necessidades de um trabalho avançado de programação (BANGSOW, 2010).

Em tempo, o *Plant Simulation* é uma ferramenta de simulação de eventos discretos, ou seja, mostra a mudança de estado dos componentes apenas em pontos específicos do tempo (passo a passo), sendo também uma aplicação orientada ao objeto (que permite aos objetos ditos “filhos” herdarem as propriedades de seus ditos “pais”) (SIEMENS, 2009).

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O método de pesquisa utilizado para a realização do trabalho é o da pesquisa-ação, sendo que a atuação do pesquisador abrange o equacionamento do problema, acompanhamento e avaliação das ações propostas para solução do mesmo.

A pesquisa-ação traz um processo de intervenção, entrando em um sistema de relacionamentos entre pessoas, buscando ajudá-las. Considerando este processo, o pesquisador participa do processo de mudança, deixando de ser apenas um observador, e atuando com o intuito de solucionar um problema e contribuir com conceitos visando o desenvolvimento do sistema (CARR, 2006).

Concebida e realizada associadamente a uma ação com o intuito de solucionar algo, a pesquisa-ação é uma pesquisa com base empírica, em que os pesquisadores são envolvidos de modo participativo ou cooperativo (THIOLENT, 2007).

Para o trabalho proposto, foi elaborado um fluxo específico de tarefas (seção 3.3), considerando a estrutura desse método de pesquisa. Sendo assim, foi estudada a bibliografia correlata ao tema; modelou-se o sistema produtivo em *software* de simulação computacional considerando base de dados obtida através de informações colhidas na empresa. Foram determinados indicadores para análise; e, com base em sucessivas simulações de possibilidades, buscou-se um resultado ideal de modificação do sistema para o atendimento da nova demanda de produção.

3.1 A EMPRESA

Este trabalho foi realizado na Endosul Pinturas Automotivas Ltda – Filial (denominada PEC), localizada em Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil. Atuaram no processo de desenvolvimento deste trabalho principalmente as áreas industriais da empresa, lê-se produção, logística, engenharia, processo e manutenção, considerando o auxílio da área de tecnologia de informação. Os profissionais envolvidos são engenheiros e coordenadores de operação, assim como a gerência industrial da fábrica.

A PEC iniciou sua operação completa no dia cinco de janeiro de 2009, sendo concebida por meio de uma parceria entre a empresa brasileira Randon Implementos e a multinacional alemã Eisenmann. O objetivo foi conceber uma empresa com tecnologia mundial no segmento

de pinturas automotivas, para suprir a demanda da Randon em ofertar produtos com elevados padrões de desempenho de acabamento superficial.

A Eisenmann é um fornecedor internacional de sistemas de tecnologia em acabamento de superfícies, tecnologia ambiental, automação de fluxo de materiais, e processos de alta temperatura. Além de projetar as fábricas e construir os equipamentos, a empresa também opera linhas de tratamento superficial para os clientes.

A Eisenmann possui duas unidades em parceria com o grupo Randon, sendo denominadas PEC e Mastertech. Estas possuem aproximadamente 700 funcionários divididos quase que igualmente entre as unidades.

3.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO ATUAL

A unidade PEC promove o tratamento superficial por meio dos processos de: jateamento, pré-tratamento (com fosfatização), *e-coat* (pintura por eletrodeposição catódica), e *top-coat* (pintura de acabamento com tinta pó poliéster ou tinta líquida poliuretânica).

3.2.1 Conceituação de projeto do cliente Randon

Os itens processados para o cliente Randon são basicamente peças e chassis, sendo que cada implemento rodoviário (carreta) possui um número de projeto único. A figura 19 apresenta um modelo de produto da Randon Implementos.

Figura 19 – Exemplo de produto da Randon Implementos

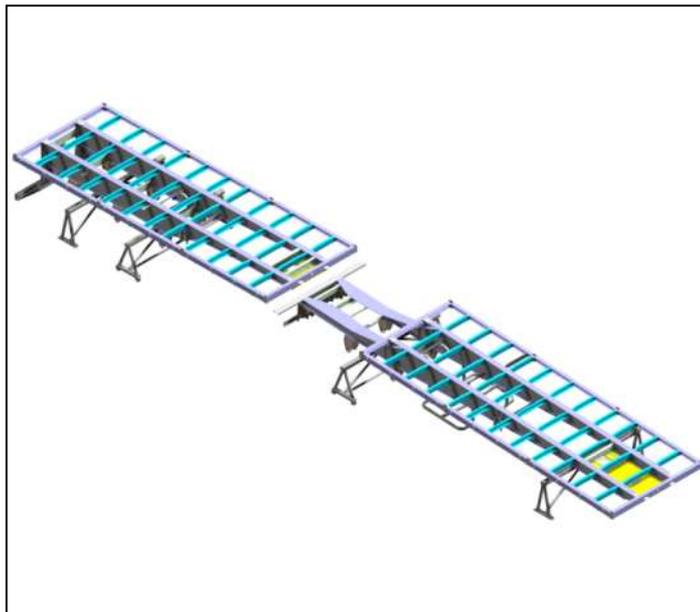


Fonte: Sistema Interno Randon Implementos, 2009.

Uma vez que um cliente da Randon (podendo ser uma empresa transportadora ou um profissional autônomo) solicita a fabricação de um implemento rodoviário, dá-se o início do fluxo através de um projeto, que possui informações como: tipo de carreta, tipo de assoalho, sistema de suspensão, tipo de freios, entre outros. Sendo assim, quando for referido a projeto neste trabalho, trata-se de um produto para um cliente da Randon, composto de itens que estruturam a carreta solicitada, e a maior parte destes itens são pintados na PEC.

O projeto é composto, basicamente, por dois itens principais: chassi e caixa de carga. O chassi é a estrutura de base da carreta, sendo que a figura 20 apresenta um exemplo de chassi que é recebido pela Endosul e passa pelos processos de jateamento, pré-tratamento químico, *e-coat* e *top-coat*. A caixa de carga contempla as peças que são montadas acima do chassi e proporcionam um fechamento lateral da carga na carreta.

Figura 20 – Exemplo de chassi a ser processado na PEC



Fonte: Sistema Interno Endosul, 2012.

Os chassis e as caixas de carga são enviados para a PEC contendo a identificação de seus respectivos projetos que, em conjunto e após a pintura, serão montados para um cliente específico da Randon. Sendo assim, o chassi e sua respectiva caixa de carga possuem o mesmo número de projeto, conforme a configuração do pedido de venda. As peças em geral (componentes avulsos e sub-montagens) são enviados por meio de códigos padrão, conforme o tipo de peça.

3.2.2 Carregamento e movimentação

Buscando um entendimento dos elementos que compõem o sistema estudado, dar-se-á a apresentação e uma explanação acerca dos mesmos.

- Barras de carga

As denominadas Barras de Carga (BC) ou *jobs* são barras com 16 metros de comprimento e 2,5 toneladas de massa, e que possuem 19 olhais espaçados em 0,8 metros. A figura 21 apresenta uma barra de carga.

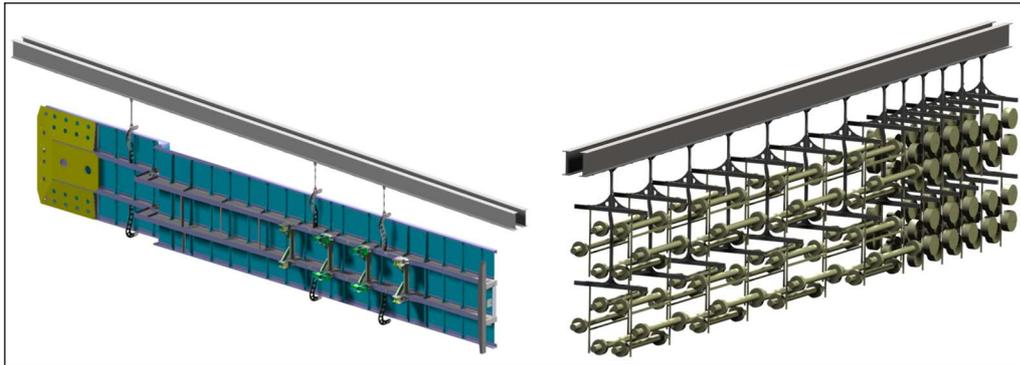
Figura 21 – Vistas isométrica da barra de carga



Fonte: Sistema Interno Endosul, 2012.

Por meio das barras de carga são realizadas as movimentações de todos os itens ao longo do processo, sendo a unidade produtiva mais utilizada para mensuração da capacidade do sistema. Conforme a configuração de carregamento dos itens nas barras de carga sabe-se quantos *jobs* são necessários para atender a demanda de produção. Na figura 22 são apresentados dois exemplos de carregamento das barras de carga, com chassis e peças. Os chassis são pendurados por meio de dispositivos de içamento, sendo compostos de ganchos que são posicionados nos olhais da barra de carga. No *job* de peças, são utilizados dispositivos denominados de “T”s (devido ao formato da letra do alfabeto, de forma invertida). Estes dispositivos visam maximizar a alocação de peças na barra de carga.

Figura 22 – Ilustração do carregamento da barra de carga



Fonte: Sistema Interno Endosul, 2012.

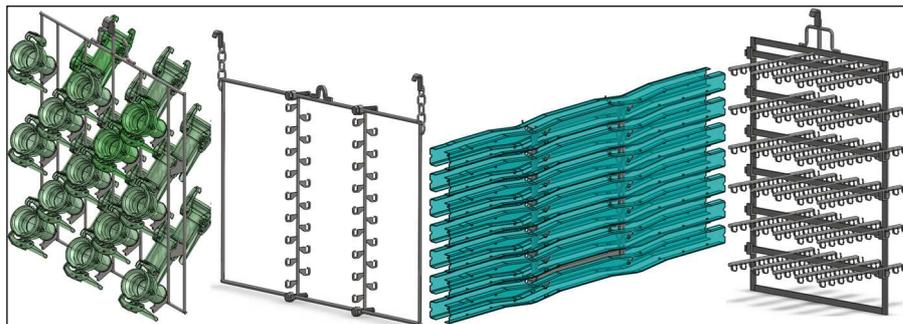
Uma barra de carga pode carregar chassis, ou peças, com diferentes configurações, respeitando restrições de dimensional e massa. A dimensão para carregamento de uma barra de carga é de 16 x 1,7 x 2,9 (comprimento x largura x altura, em metros), e a massa limite é de 4,5 toneladas.

Para o fluxo produtivo de chassis, a barra de carga pode carregar um, dois, ou três itens, dependendo do dimensional e massa totais. Para peças, é necessário agrupá-las por semelhança em relação ao processo produtivo, considerando: necessidade de jateamento, tempo de estufagem para cura, tipo de pintura de acabamento, entre outros.

- Gancheiras

As gancheiras visam dispor as peças na barra de carga de tal maneira a garantir a qualidade no processo e atingir a máxima utilização dos espaços disponíveis no *job*. A busca é pelos melhores resultados nos processos como jateamento, pré-tratamento, *e-coat* e *top-coat*, assim como manter as peças dentro dos limites dimensionais da barra de carga, e facilitar as atividades de carga e descarga. A figura 23 mostra exemplos diversos de gancheiras.

Figura 23 – Exemplos de gancheiras



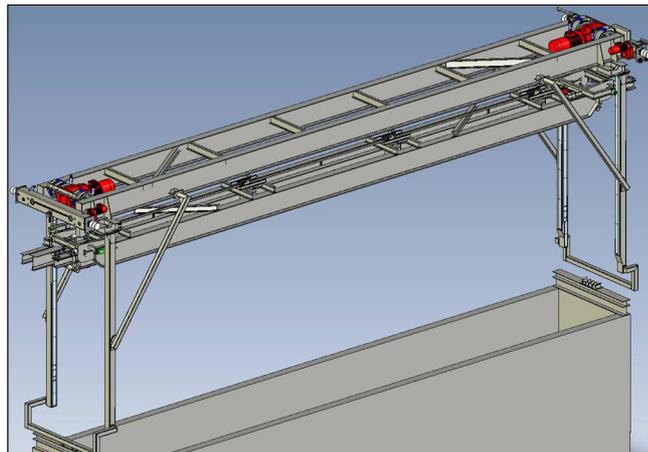
Fonte: Sistema Interno Endosul, 2012.

As informações acerca da disposição das peças nas gancheiras são fundamentais para o planejamento da produção. A quantidade disponível de cada dispositivo de carga é uma variável importante para o cálculo da capacidade produtiva de um item específico.

- Sistemas de movimentação

A movimentação das barras de carga no sistema é executada por meio de pontes rolantes automáticas, conectadas a um Controlador Lógico Programável (CLP) que coordena todos os deslocamentos conforme o roteiro de produção e a lógica programada. A figura 24 apresenta um exemplo de ponte rolante do sistema.

Figura 24 – Exemplos de ponte rolante automática



Fonte: Sistema Interno Endosul, 2012.

Um dos fatores mais importantes para a determinação da capacidade produtiva do sistema está relacionado à capacidade do próprio sistema de movimentação.

Estas pontes rolantes movimentam as barras de carga ao longo do fluxo produtivo, depositando-as e retirando-as das posições de processo. Este sistema é denominado estacionário ou *stop-and-go*.

No caso dos processos *top-coat* para peças, o sistema de transporte é executado por transportadores aéreos de corrente, sendo que as peças são separadas em unidades produtivas menores que nas barras de carga. Este transportador, também denominado contínuo, movimenta-se a uma velocidade constante, sendo que esta velocidade está atrelada ao tempo de permanência das peças nos processos de pintura, estufa e resfriamento.

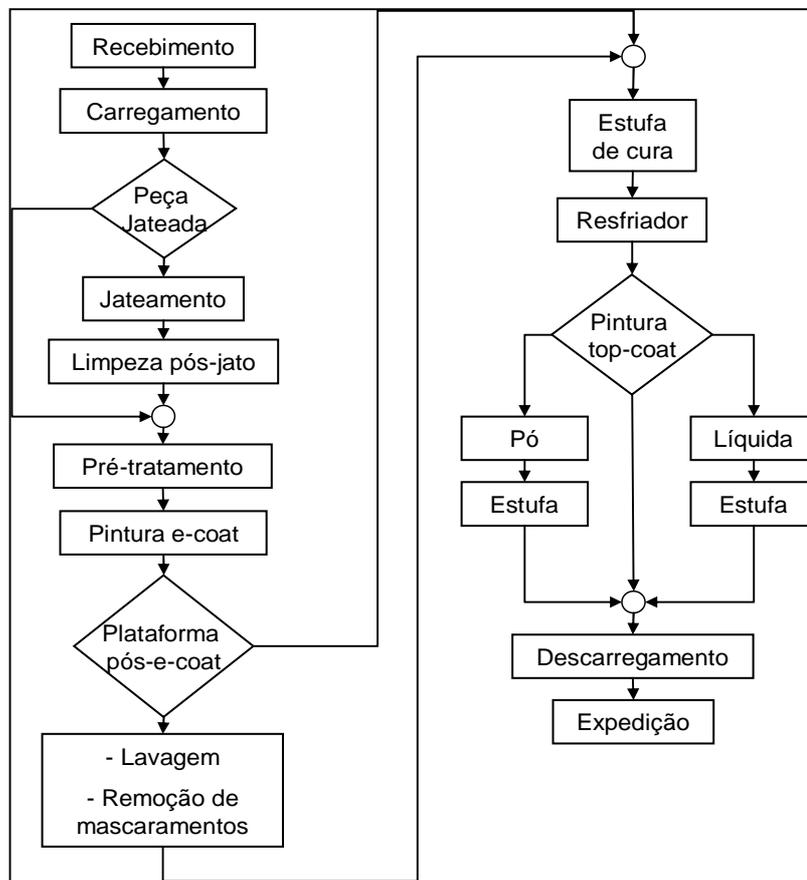
- *Buffers* (Estoques Intermediários)

Consistem em posições de estoque intermediário entre os processos produtivos. Estes *buffers* buscam atenuar pequenas variabilidades nos tempos de ciclo e também são utilizados para esvaziar alguns processos que não podem ficar carregados no momento de desligamento da linha. O sistema possui 11 posições de *buffer* para barras de carga no fluxo *e-coat*, e 6 posições no fluxo *top-coat* de chassis.

3.2.3 Layout e fluxo produtivo

O fluxo produtivo da planta estudada está localizado em dois andares (níveis), sendo o nível -1 o inferior, e o nível 0 o superior. O fluxo é dividido em dois grandes grupos, o de chassis e o de peças. O processo *e-coat* é comum e compartilhado por ambos os fluxos, contudo chassis e peças possuem processos individuais para jateamento e pintura *top-coat*, assim como carga e descarga de linha. A figura 25 apresenta um diagrama de fluxo do processo de chassis.

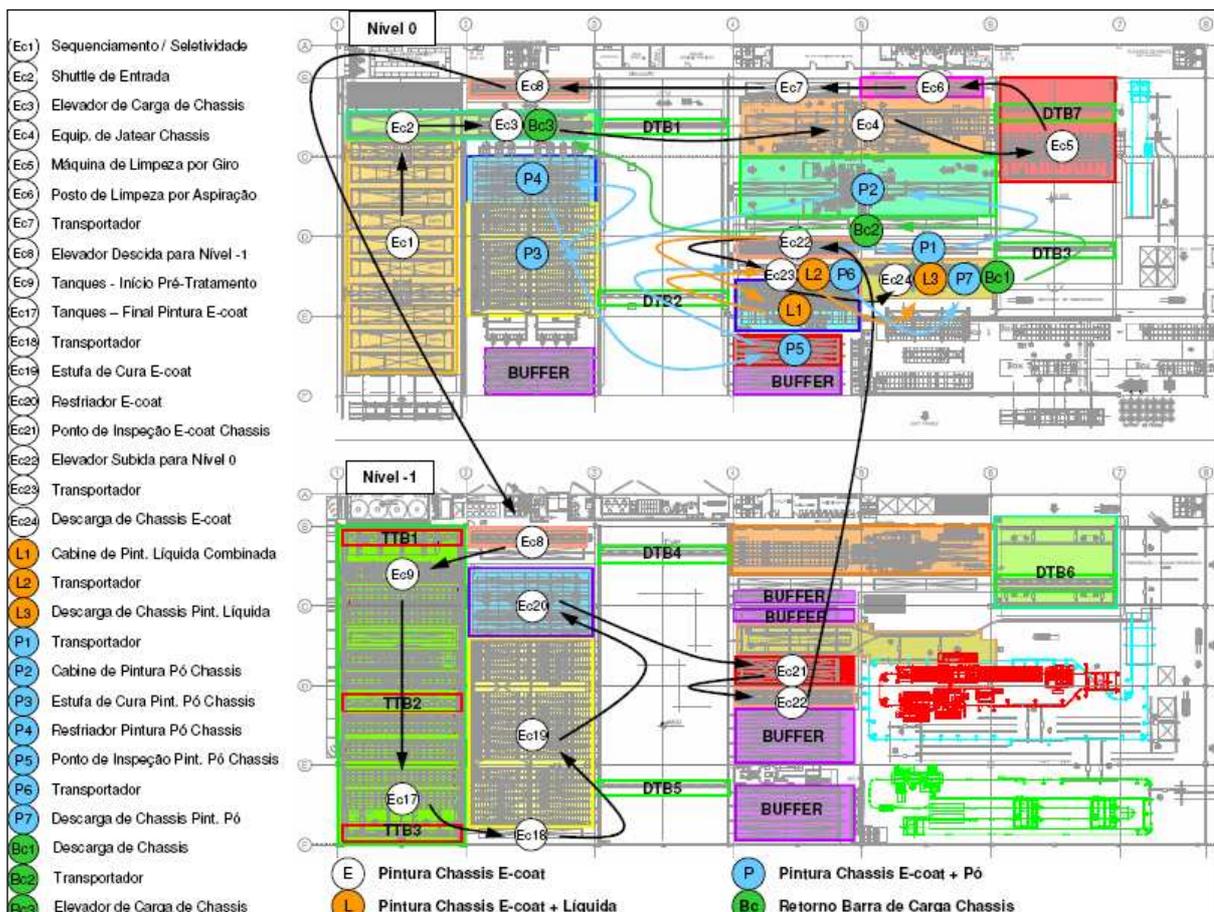
Figura 25 – Diagrama do fluxo de processo de chassis



Fonte: Sistema Interno Endosul, 2012.

Os chassis são entregues à PEC no nível 0, provenientes das linhas de fabricação da Randon Implementos, e movimentados diretamente para uma área de entrada da Endosul. Dá-se o carregamento, o jateamento na posição horizontal, e após ocorre uma rotação e reposicionamento para a posição vertical. Após, os chassis são transportados para o nível -1 através de um sistema de elevador, e deslocados para o pré-tratamento, *e-coat*, estufagem e resfriamento. Passam por um posto de trabalho de preparação para o *top-coat* e são movimentados novamente ao nível 0 por meio de outro elevador. Uma vez no nível 0, os chassis passam pelos processos de pintura *top-coat*, estufagem, resfriamento e inspeção, antes de serem entregues à Randon Implementos para montagem dos sistemas de suspensão. A figura 26 apresenta uma ilustração desse fluxo de chassis, contemplando o arranjo físico da fábrica e as setas de movimentação entre as posições.

Figura 26 – Ilustração do fluxo de chassis

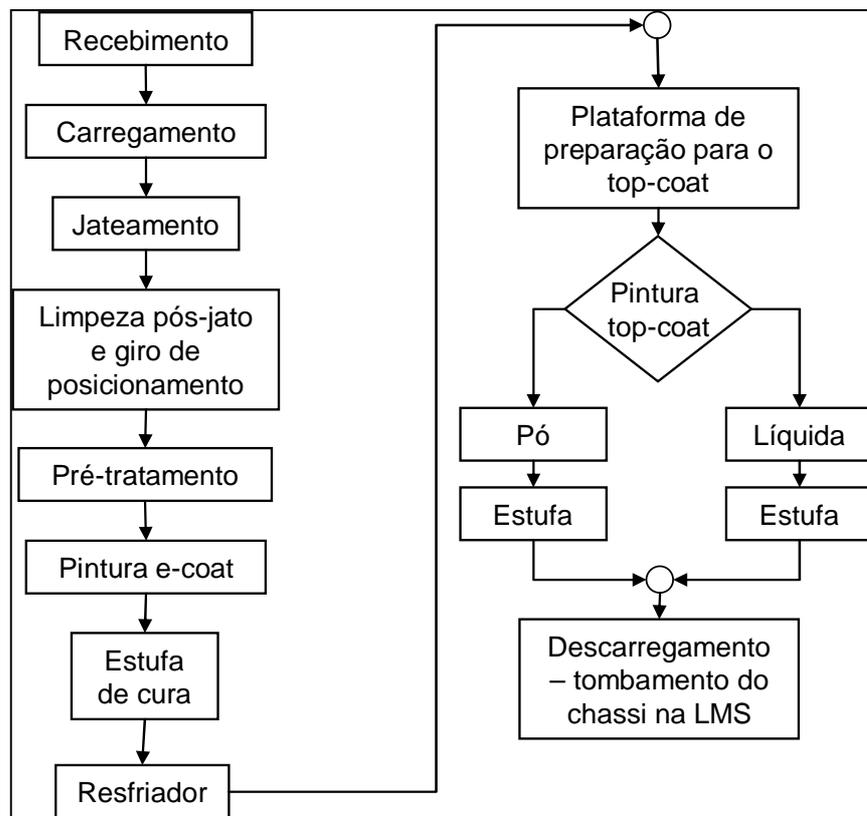


Fonte: Sistema Interno Endosul, 2012.

As peças são recebidas no nível -1 e carregadas em um posto de trabalho nas suas respectivas gancheras e, após, são dispostas na barra de carga. Posto isso, ocorre o jateamento

e a remoção do acúmulo de granalha. Na sequência a barra de carga é transferida para os mesmos taques de pré-tratamento e *e-coat* dos chassis. Peças e chassis compartilham, ainda, as mesmas estufas e resfriadores (condizentes ao fluxo do *e-coat*). Após o resfriamento, as peças são descarregadas da barra de carga e transferidas, em suas gancheiras, para transportadores contínuos que as levam pelos processos de *top-coat*. Após o *top-coat*, as peças são descarregadas e expedidas ao cliente. A figura 27 apresenta um diagrama do fluxo de peças.

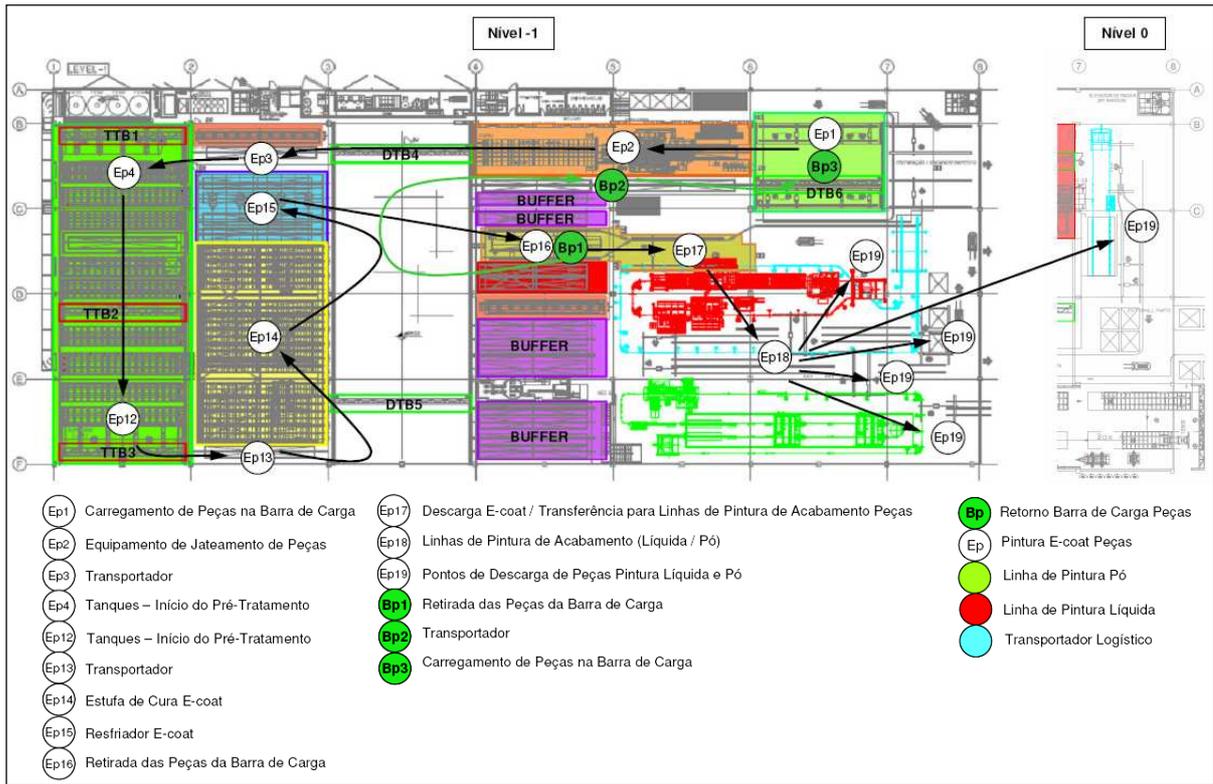
Figura 27 – Diagrama do fluxo de peças



Fonte: Sistema Interno Endosul, 2012.

A figura 28 expõe o fluxo de peças considerando o arranjo físico da fábrica, contemplando as movimentações entre as posições. O fluxo *e-coat* é representado pelas posições com indicações em branco. O retorno das barras de carga vazias, após o descarregamento, para serem novamente carregadas, é apresentado com indicações na cor verde.

Figura 28 – Ilustração do fluxo de peças



Fonte: Sistema Interno Endosul, 2012.

A fábrica trabalha atualmente em dois turnos de trabalho, com aproximadamente 350 funcionários divididos quase que igualmente nos turnos de operação.

3.2.4 Logística

A logística de transporte dos itens entre as empresas do Grupo Randon e a Endosul acontece de diferentes formas, conforme o item específico.

Os chassis possuem uma entrada diretamente conectada às linhas de fabricação da Randon Implementos. O pavilhão da Endosul encontra-se anexado ao parque fabril da Randon, visando simplificar ao máximo o fluxo entre as empresas.

Dada a fabricação dos chassis, estes são liberados para o carregamento da Endosul, juntamente com a nota fiscal eletrônica e as informações de produção. Os chassis entram em uma fila na PEC, onde aguardam o momento de carregamento na linha de produção da Endosul. Após o processamento, os chassis são entregues com uma nota fiscal eletrônica de cobrança para a Randon, em posto de trabalho específico. Neste posto, os chassis passam a ser novamente de responsabilidade da Randon, sendo reposicionados em um sistema para montagem de

suspensões e demais componentes.

As peças são enviadas por meio de carretões, locomovidos por tratores ao longo de vias entre as fábricas. As peças chegam à PEC em *pallets* ou caixas, e aguardam seu sequenciamento de entrada na linha. As peças também são recebidas e expedidas com notas fiscais eletrônicas, e também etiquetas com códigos de barra de identificação.

Outro fato importante a ser considerado é a importância do sincronismo entre os chassis e as peças que montarão as caixas de carga. Cada chassi e caixa de carga são projetos únicos, que devem ser entregues pela PEC em momentos específicos, para que haja um alinhamento de fluxos para a montagem final da Randon Implementos.

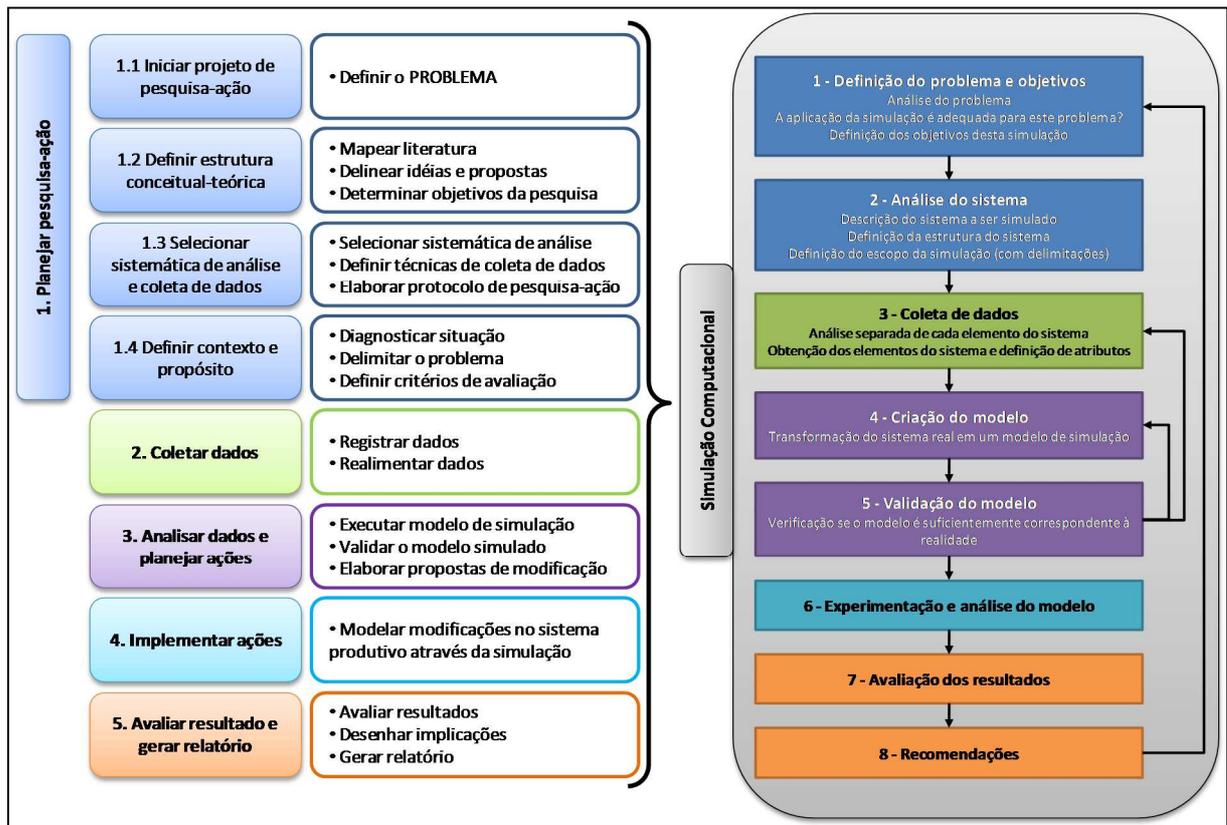
3.3 ESTRUTURAÇÃO DAS ETAPAS DO TRABALHO COM BASE NA PESQUISA-AÇÃO

Para Thiollent (2007), a pesquisa-ação consiste na produção de conhecimento orientada pela prática, considerando a modificação de uma determinada realidade como parte do processo de pesquisa.

Neste contexto, foram analisadas as estruturas da pesquisa-ação propostas por Westbrook (1995), Coughlan e Coughlan (2002), e Thiollent (2007) – figura 29 – visando a criação de um modelo específico a ser utilizado no presente trabalho. Além disso, foi inserido um fluxo de condução de etapas da simulação computacional com base na estrutura proposta por Siemens (2009), buscando, por meio desta ferramenta, a implementação e análise virtual das modificações sugeridas no processo de solução do problema.

O modelo de pesquisa-ação conforme autores citados passa por etapas de planejamento, coleta de dados, análise e implementação de ações e avaliação dos resultados (observadas a esquerda da figura 29). A ferramenta de simulação computacional (foco desse trabalho) é inserida nesta estrutura visando a análise das soluções propostas em um modelo virtual, gerando, com isso, resultados que expressam a realidade futura no caso de execução real no sistema. Assim, as etapas definidas para confecção do trabalho podem ser visualizadas a direita da figura 29, e são sustentadas pelo método da pesquisa-ação.

Figura 29 – Estrutura da pesquisa-ação aliada ao projeto de simulação

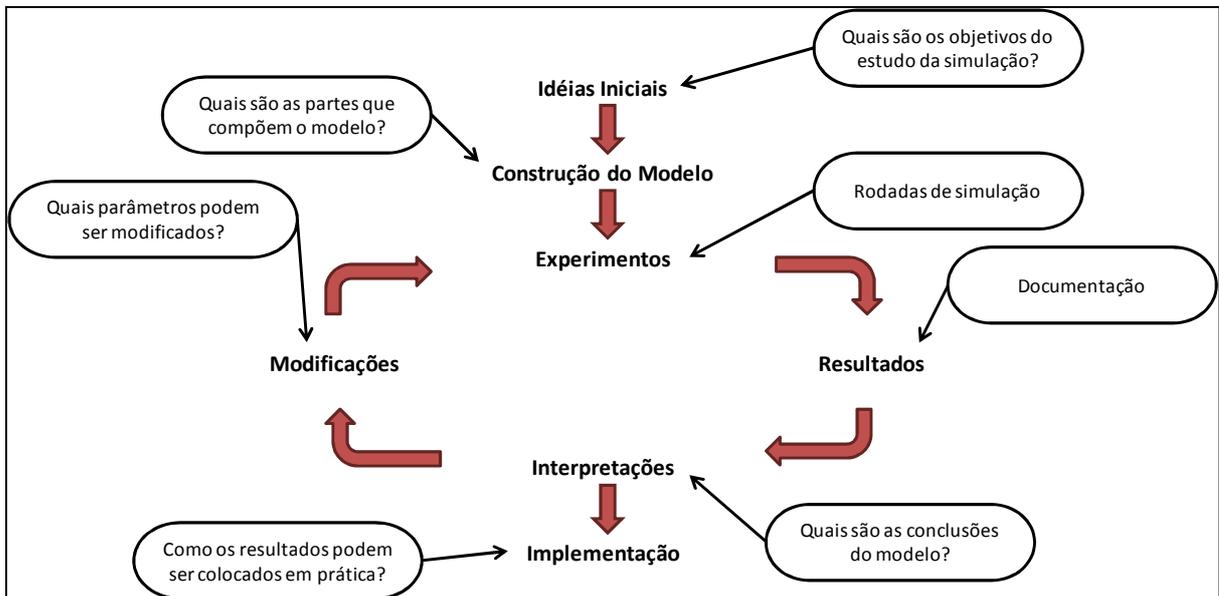


Fonte: Adaptado de Westbrook (1995), Coughlan e Coughlan (2002), Thiollent (2007), e Siemens (2009).

O estudo de caso possibilita a análise científica de um projeto de investimento na fábrica, sendo o projeto de maior relevância com relação ao aumento da capacidade produtiva da empresa estudada até 2015. Haja vista a complexidade da análise por meio exclusivo do conhecimento dos gestores da empresa, a simulação computacional apresentou uma possibilidade de análise científica de avaliação das modificações propostas.

Para a Siemens (2009), é necessário que o projeto de simulação apresente metas para que os resultados sejam medidos com relação aos objetivos propostos. Com as métricas definidas, o processo de construção de um modelo com acuracidade fica simplificado. Durante o modelamento, os fatores que afetam os resultados devem ser modelados, ao passo que alguns fatores de influência desprezível devem ser assumidos ou ignorados. Uma vez construído, o modelo deve ser validado, sendo que uma análise comparativa entre o modelo simulado e o sistema real deve ser executada. Caso o modelo esteja de acordo com a realidade, então experimentações podem ser feitas. Modificações devem ser executadas uma a uma, buscando a preservação da análise correta de causa-efeito. Estes experimentos irão mostrar possibilidades de mudança, sendo estas testadas no modelo de simulação antes da implementação no sistema real. A figura 30 apresenta este fluxo.

Figura 30 – Fluxo da simulação computacional



Fonte: Siemens, 2009.

Com base no fluxo cíclico apresentado na figura 30, foram realizados os experimentos de simulação considerando as sugestões de modificação no sistema propostas pelo grupo de trabalho, sendo este grupo composto de por um engenheiro de produção especializado em simulação computacional, um coordenador de produção, um engenheiro mecânico coordenador de manutenção, um engenheiro químico coordenador de processo, e um engenheiro mecânico coordenador de engenharia, além do engenheiro de produção e gerente industrial que é autor deste trabalho. Com isso, os envolvidos na pesquisa buscaram compreender os fenômenos observando-os, interpretando-os e descrevendo-os.

Uma vez que os mesmos foram desenvolvidos em um âmbito virtual, a flexibilidade para as modificações é facilitada, assim como os dados gerados foram coletados automaticamente.

Sendo assim, considerando as etapas do trabalho proposto, buscou-se apresentar um processo para a condução da pesquisa por meio da pesquisa-ação, utilizando a simulação computacional como ferramenta de auxílio na resolução do problema proposto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Haja vista a estrutura proposta e apresentada na figura 29, aliada às atividades expostas no cronograma da figura 31, deu-se a aplicação da pesquisa proposta neste trabalho.

4.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVOS

A definição do problema aplicado à simulação se funde com a própria definição do problema de pesquisa do presente trabalho que é comprovar, por meio da simulação computacional e antes da aprovação do investimento, que as modificações propostas no sistema de produção estudado irão atender o aumento de demanda proposto.

Os objetivos estão relacionados à análise das modificações propostas e comprovação, ou não, do aumento da capacidade produtiva. Sendo a simulação computacional uma ferramenta que propicia uma análise dinâmica e precisa dos resultados relacionados às mudanças propostas na fábrica estudada.

4.2 ANÁLISE DO SISTEMA

O sistema simulado é a planta de pintura de chassis da Randon Implementos Rodoviários (PEC), sendo que a mesma foi descrita nos itens 3.1 e 3.2 deste trabalho.

O escopo da simulação é delimitado pelo processo completo de pintura dos chassis, desde sua carga até sua descarga. Não são consideradas variáveis relacionadas ao abastecimento e retirada dos produtos por parte da Randon.

4.3 COLETA DE DADOS

Os dados de entrada são agrupados em: tipos de produtos, fluxos de processo, mix de produtos, tempos de processo, e transportadores.

4.3.1 Tipos de produtos

As diferentes famílias de chassis foram agrupadas em 5 categorias:

- a) chassi *e-coat* sem chapa: chassi sem chapa que passa apenas pelo pré-tratamento, sem pintura posterior (pó ou líquida);
- b) chassi pó com chapa: chassi com chapa que passa pelo pré-tratamento e depois recebe pintura pó;
- c) chassi pó sem chapa: chassi sem chapa que passa pelo pré-tratamento e depois recebe pintura pó;
- d) chassi líquida com chapa: chassi com chapa que passa pelo pré-tratamento e depois recebe pintura líquida; e
- e) chassi líquida sem chapa: chassi sem chapa que passa pelo pré-tratamento e depois recebe pintura líquida.

As peças foram agrupadas em apenas 2 categorias:

- a) peças leves: peças de até 20kg que passam pelo pré-tratamento e depois recebem pintura pó ou líquida (apenas o processo de pré-tratamento é contemplado pelo modelo); e
- b) peças pesadas: peças de mais de 20Kg que passam pelo pré-tratamento e depois recebem pintura pó ou líquida (apenas o processo de pré-tratamento é contemplado pelo modelo).

4.3.2 Fluxos de processo

Neste trabalho estão contemplados o processo completo de pintura de chassis, e apenas o processo de pré-tratamento de peças, não sendo consideradas as linhas de acabamento de peças.

A entrada e a saída de chassis ocorre no nível 0 da planta, enquanto que a entrada e a saída de peças ocorre no nível -1. A seguir são especificadas as macro etapas do fluxo produtivo para cada tipo de produto:

- a) chassi *e-coat* (sem chapa): carga, jato, *rotate machine*, limpeza fina, LP01 (descida ao nível -1), pré-tratamento, estufa, resfriador, preparação (ou *buffer*, depois preparação), LP02 (subida ao nível 0), auditoria (ou *buffer*, depois auditoria), descarga;
- b) chassi pó (com e sem chapa): carga, jato, *rotate machine*, limpeza fina, LP01 (descida ao nível -1), pré-tratamento, estufa, resfriador, preparação (ou *buffer*, depois preparação), LP02 (subida ao nível 0), pintura pó, estufa, resfriador, auditoria (ou *buffer*, depois auditoria), descarga;

- c) chassi líquida (com e sem chapa): carga, jato, *rotate machine*, limpeza fina, LP01 (descida ao nível -1), pré-tratamento, estufa, resfriador, preparação (ou *buffer*, depois preparação), LP02 (subida ao nível 0), pintura líquida, auditoria (ou *buffer*, depois auditoria), descarga; e
- d) peças (leves e pesadas): carga, jato, limpeza fina, pré-tratamento, estufa, resfriador, descarga.

4.3.3 Mix de produtos

Com base em informações coletadas com o setor de planejamento e controle de produção da empresa, foram definidas as quantidades de barras de carga a serem utilizadas no sistema, bem como a distribuição percentual dos diferentes tipos de produtos. O quadro 7 contém as quantidades de barras de carga utilizadas para o fluxo de chassis e para o fluxo de peças.

Quadro 7 – Quantidades de barras de carga

| Tipo de produto | Quantidade de barras de carga |
|------------------------|--------------------------------------|
| Chassis | 33 |
| Peças | 12 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

No quadro 8 são apresentados os valores percentuais de cada tipo de produto que compõe o mix de produção. A entrada dos diferentes tipos de produtos no processo ocorre de forma aleatória, respeitando os percentuais definidos.

Quadro 8 – Mix de produção

| Tipo de chassis | % | Tipo de peças | % |
|----------------------------------|-----------|----------------------|-----------|
| Chassis e-coat | 15 | Peças leves | 50 |
| Chassis pó com chapa | 40 | Peças pesadas | 50 |
| Chassis pó sem chapa | 40 | | |
| Chassis líquida com chapa | 3 | | |
| Chassis líquida sem chapa | 2 | | |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

4.3.4 Tempos de processo

Os tempos de processo podem ser divididos em 3 grupos: os tempos dos postos de trabalho, que são as estações que envolvem trabalho manual; os tempos de estufagem e resfriamento; e os tempos de processo nos tanques de pré-tratamento.

Nos postos de trabalho foi empregada uma distribuição de probabilidades triangular. Para Chung (2004) a distribuição triangular pode ser utilizada quando não há um conhecimento completo dos dados, mas suspeita-se que eles não são uniformemente distribuídos. O autor expõe que para utilização da distribuição triangular não é necessária uma grande quantidade de dados, sendo que os três valores de mínimo, máximo e moda estimados podem ser obtidos pela experiência dos gerentes de produção e operadores dos postos de trabalho. Ainda segundo o autor, a distribuição triangular é adequada como entrada de dados para estações de trabalho que envolvam trabalho manual. Os tempos coletados são referentes a medições realizadas no chão de fábrica e informações levantadas com os operadores. Esses tempos foram realizados em condições ideais de operação dos postos de trabalho, em termos de quantidade de operadores e ergonomia. Estes valores podem não ocorrer em alguns momentos por conta de decisões estratégicas de produção, como, por exemplo, relocação de pessoal para outras atividades. Complementarmente, foi realizado um estudo de medição de tempos dos postos de trabalho utilizando uma metodologia específica, sendo estes apresentados no Apêndice C. No quadro 9 são listados os valores empregados como moda e limites inferior e superior, referentes a cada posto de trabalho.

Quadro 9 – Tempos de processo nos postos de trabalho

| Posto de trabalho | Tempo [h:min:s] | | |
|---------------------------|-----------------|---------|-----------------|
| | Limite inferior | Moda | Limite superior |
| Carga de chassis | 5:00 | 5:40 | 7:00 |
| Rotate machine | 8:00 | 8:40 | 10:00 |
| Limpeza fina de chassis | 8:00 | 8:40 | 10:00 |
| Limpeza UF | 5:00 | 5:40 | 7:00 |
| Preparação de chassis | 18:00 | 18:40 | 20:00 |
| Auditoria de chassis | 14:00 | 14:40 | 16:00 |
| Pintura líquida (chassis) | 1:40:00 | 1:46:40 | 2:00:00 |
| Descarga de chassis | 5:00 | 5:40 | 7:00 |
| Carga de peças | 22:00 | 22:30 | 23:30 |
| Limpeza fina de peças | 8:00 | 8:40 | 10:00 |
| Descarga de peças | 28:00 | 28:40 | 30:00 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

No apêndice A são apresentados os layouts dos níveis 0 e -1 da Endosul, onde pode ser identificada a localização dos diferentes postos de trabalho.

Para os tempos de estufagem e resfriamento de chassis, foram empregados valores para os processos *e-coat* e *top-coat*. Para as peças, como o modelo não contempla as linhas de acabamento, foram utilizados apenas os tempos para o processo *e-coat*. O quadro 11 contém os valores aplicados para os tempos de estufagem e resfriamento.

Quadro 10 – Tempos de estufagem e resfriamento

| Estação | Tempo [min] | | | |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------|---------------|
| | Chassis com chapa | Chassis sem chapa | Peças leves | Peças pesadas |
| Estufa e-coat | 50 | 50 | 30 | 60 |
| Resfriador e-coat | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Estufa top-coat | 50 | 50 | | |
| Resfriador top-coat | 30 | 30 | | |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

O tempo de processamento nos tanques é dividido em 4 etapas: descarga (da barra no tanque); imersão; carga (retirada da barra do tanque); e escoamento. O tempo de escoamento é empregado apenas para chassis.

Os tempos de descarga e carga são iguais para todos os tipos de chassis e para todos os tipos de peças. Também não há variação com relação aos tanques, com exceção do tempo de descarga de chassis no tanque *e-coat*, cujo tempo é maior que os demais. O quadro 11 especifica os tempos de descarga e carga empregados no modelo.

Quadro 11 – Tempos de descarga e carga nos tanques

| Tanque | Processo | Tempo [s] | | | |
|----------------|----------|-------------------|-------------------|-------------|---------------|
| | | Chassis com chapa | Chassis sem chapa | Peças leves | Peças pesadas |
| E-coat | Descarga | 90 | 90 | 45 | 45 |
| | Carga | 50 | 50 | 45 | 45 |
| Outros tanques | Descarga | 50 | 50 | 45 | 45 |
| | Carga | 50 | 50 | 45 | 45 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

Os tempos de imersão e escorrimento variam para os diferentes tanques e de acordo com o tipo de produto. No quadro 12 são listados os valores destes tempos para as diferentes condições.

Quadro 12 – Tempos de imersão e escorrimento nos tanques

| Tanque | Processo | Tempo [s] | | | |
|----------------|--------------|-------------------|-------------------|-------------|---------------|
| | | Chassis com chapa | Chassis sem chapa | Peças leves | Peças pesadas |
| Pré-desengraxe | Imersão | 120 | 120 | 120 | 120 |
| | Escorrimento | 10 | 10 | 0 | 0 |
| Desengraxe | Imersão | 180 | 180 | 180 | 180 |
| | Escorrimento | 60 | 35 | 0 | 0 |
| Enxágue I | Imersão | 45 | 45 | 45 | 45 |
| | Escorrimento | 60 | 35 | 0 | 0 |
| Fosfato | Imersão | 180 | 180 | 180 | 180 |
| | Imersão | 60 | 35 | 0 | 0 |
| Enxágue II | Escorrimento | 45 | 45 | 45 | 45 |
| | Imersão | 60 | 35 | 0 | 0 |
| Enxágue III | Escorrimento | 30 | 30 | 30 | 30 |
| | Imersão | 60 | 35 | 0 | 0 |
| E-coat | Escorrimento | 240 | 240 | 240 | 240 |
| | Imersão | 30 | 30 | 0 | 0 |
| Enxágue IV | Escorrimento | 60 | 60 | 60 | 60 |
| | Imersão | 20 | 20 | 0 | 0 |
| Enxágue V | Escorrimento | 60 | 60 | 60 | 60 |
| | Imersão | 45 | 35 | 0 | 0 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

4.3.5 Transportadores

Foram verificadas junto ao setor de manutenção as velocidades empregadas nos transportadores da fábrica. Para as pontes rolantes, foram utilizados valores de velocidade para a ponte nas condições carregada e vazia, e também para o *trolley*, sendo este último o sistema que promove as movimentações horizontais das pontes para os processos ou postos de trabalho. No quadro 13 são listadas por código as diferentes pontes rolantes do processo, sua localização e os valores de velocidade empregados.

Quadro 13 – Velocidades das pontes rolantes

| Código | Localização | Velocidade [m/s] | | |
|--------|-------------------------------|------------------|-------|---------|
| | | Ponte | | Trolley |
| | | carregada | vazia | |
| DTB1 | Em frente aos fornos top-coat | 0,67 | 1,00 | 0,75 |
| DTB2 | Em frente aos fornos top-coat | 0,67 | 1,00 | 0,75 |
| DTB4 | Em frente aos fornos e-coat | 0,67 | 1,00 | 0,75 |
| DTB5 | Em frente aos fornos e-coat | 0,67 | 1,00 | 0,75 |
| DTB3 | Entrada da linha pó | 0,67 | 1,00 | 0,75 |
| DTB6 | Carga de peças | 0,67 | 0,67 | 0,42 |
| DTB7 | Rotate machine | 0,67 | 0,67 | 0,75 |
| Demag | Buffer de entrada de chassis | 1,33 | 1,33 | 0,75 |
| Abus | Buffer de entrada de chassis | 1,33 | 1,33 | 0,75 |
| TTB1 | Tanques | 0,67 | 0,67 | 0,75 |
| TTB2 | Tanques | 0,67 | 0,67 | 0,75 |
| TTB3 | Tanques | 0,67 | 0,67 | 0,75 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

Além das pontes rolantes, há uma série de tratores e transportadores utilizados na movimentação das barras de carga. O quadro 14 lista estes transportadores por código, indica a função do mesmo, e sua velocidade de movimentação.

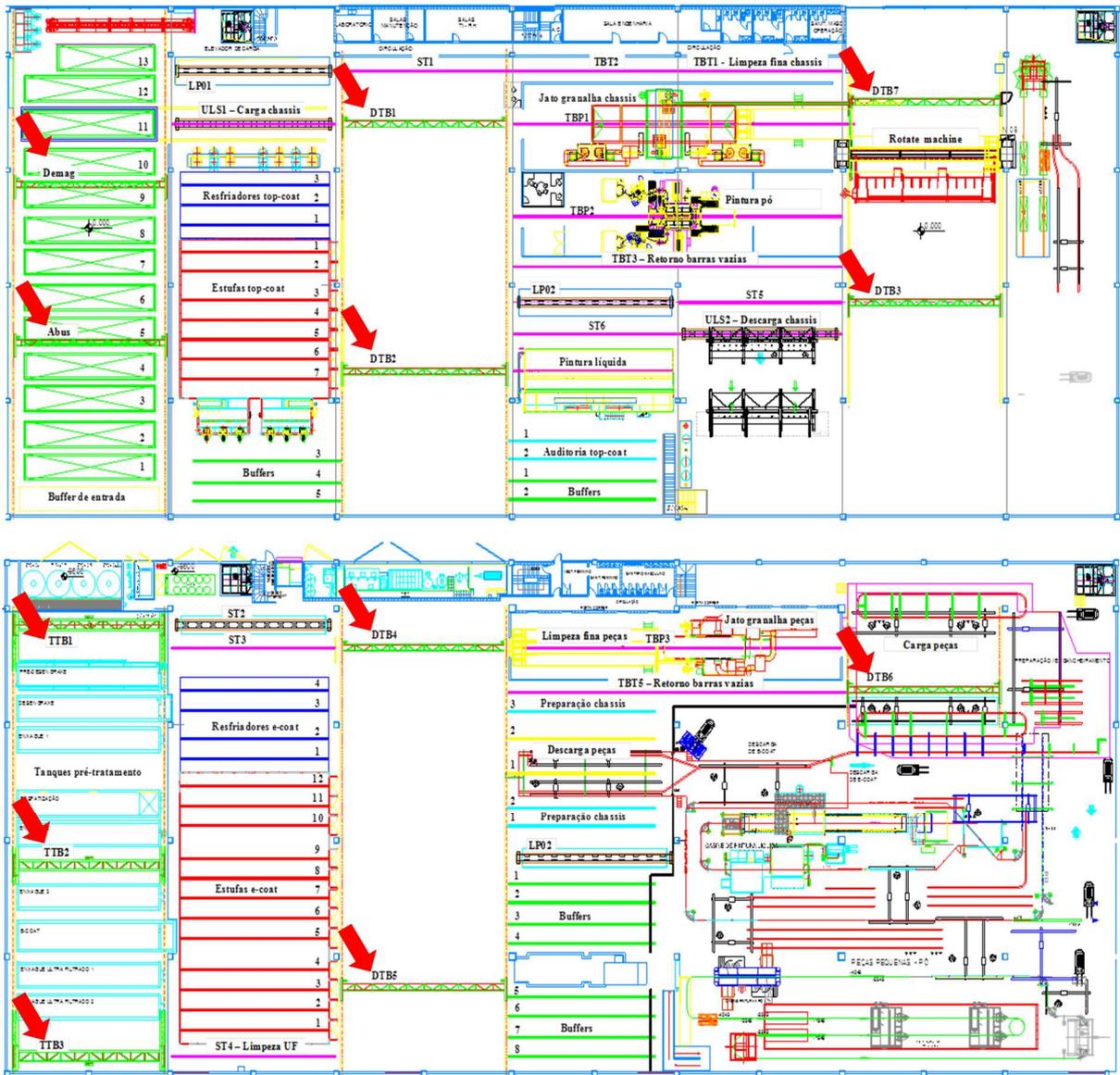
Quadro 14 – Velocidades dos tratores e transportadores

| Código | Descrição | Velocidade [m/s] |
|--------|--|------------------|
| ST1 | Trator de transferência da limpeza fina de chassis para LP01 | 1,00 |
| ST2 | Trator de transferência do LP01 para a entrada dos tanques | 1,00 |
| ST3 | Trator de transferência de peças para a entrada dos tanques | 1,00 |
| ST4 | Trator de transferência da saída dos tanques para a limpeza UF | 1,00 |
| ST5 | Trator de transferência do LP2 para o buffer da linha pó | 1,00 |
| ST6 | Trator de transferência da pré-saída de chassis para a ULS2 | 1,00 |
| TBP1 | Transportador do jato de chassis | 0,042 |
| TBP2 | Transportador da pintura pó de chassis | 0,019 |
| TBP3 | Transportador do jato de peças | 0,025 |
| TBT1 | Transportador da limpeza fina de chassis | 0,67 |
| TBT2 | Transportador de chassis da limpeza fina para ST1 | 0,67 |
| TBT3 | Transportador do retorno de barras vazias para chassis | 0,25 |
| TBT5 | Transportador do retorno de barras vazias para peças | 0,20 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

A localização das pontes rolantes, tratores e transportadores da planta pode ser visualizada na figura 32 e nos layouts apresentados no apêndice A.

Figura 31 – Layout com localização das pontes rolantes

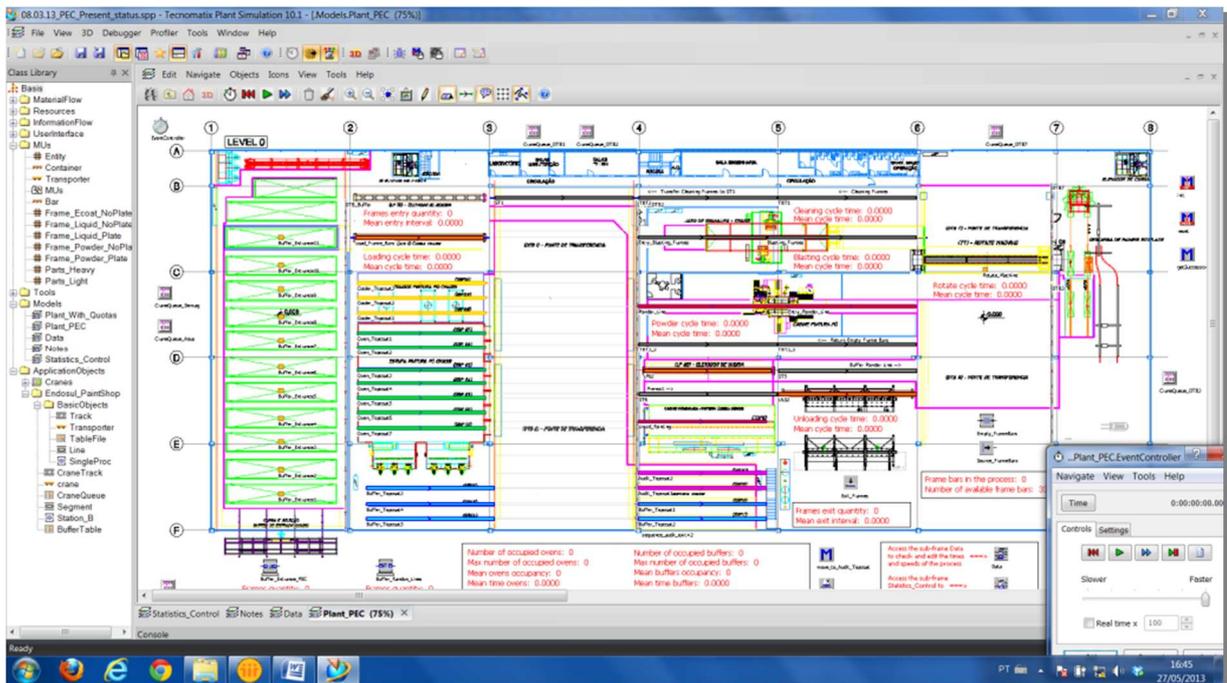


Fonte: Sistema Interno Endosul, 2012.

4.4 CRIAÇÃO DO MODELO

Esta seção apresenta uma descrição geral das estratégias, elementos e indicadores aplicados na construção do modelo de simulação. A figura 33 mostra a planta simulada no software *Tecnomatix Plant Simulation* da Siemens, podendo esta ser também visualizada no Apêndice A.

Figura 32 – Modelo de simulação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

4.4.1 Estratégias de representação dos elementos do processo produtivo

O modelo de simulação foi criado a partir de uma série de objetos básicos do *software Plant Simulation*. Os seguintes tipos de objetos básicos foram utilizados:

- Source*: fonte de unidades móveis (*moveable units - MUs*), como *entities*, *containers* e *transporters*;
- Buffer*: objeto para armazenamento de unidades móveis;
- Drain*: objeto para coleta das unidades móveis, ao final do processo;
- Entity*: unidade que circula pelo fluxo de materiais, representando os produtos em um processo produtivo;
- Container*: objeto de fluxo de materiais para armazenamento das *entities*. Ao contrário do *buffer*, o *container* pode ser movimentado em uma *line* ou por um *transporter*;
- Transporter*: objeto de transporte com propulsão própria, que pode ter velocidade e aceleração configuradas;
- Track*: objeto de fluxo de materiais passivo, ou seja, objetos de transporte com propulsão própria (*transporter*) se movimentam sobre ele;

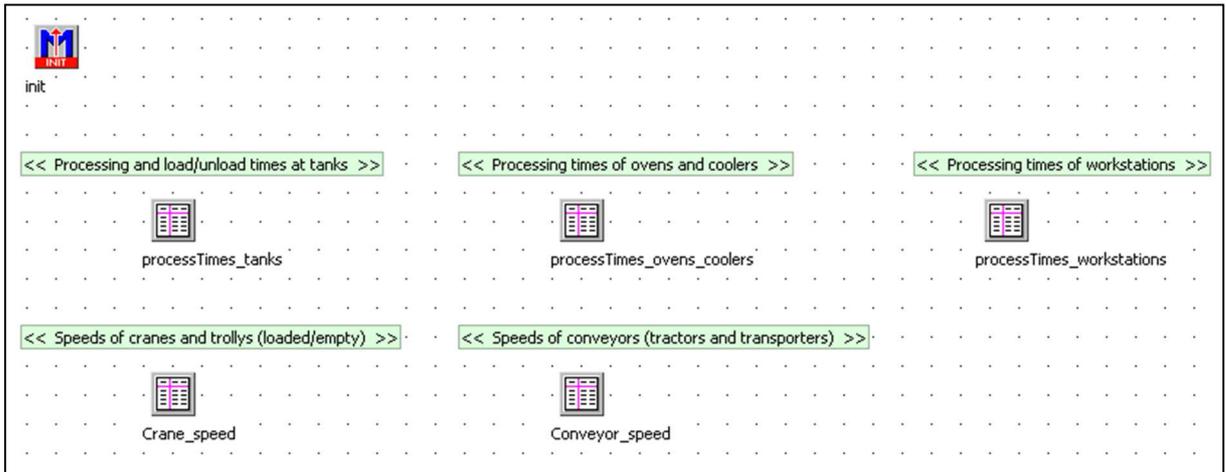
- h) *Line*: objeto de transporte ativo, ou seja, que transporta objetos de fluxo de material (*entities* ou *containers*);
- i) *TableFile*: tabela para inserção e registro de informações;
- j) *SingleProc*: objeto para representação de processos ou máquinas;
- k) *Method*: objeto utilizado para realizar a programação do modelo; e
- l) *Variable*: objeto utilizado nas rotinas programadas nos métodos.

A partir desses objetos básicos, os diferentes elementos do processo produtivo foram modelados da seguinte forma:

- a) Chassis e peças: os chassis foram modelados como *entities*, ou seja, constituem a unidade básica de movimentação no modelo. Diferentes tipos de *entities* foram criados, para representar os tipos de chassis e peças considerados no modelo;
- b) Barras de carga: *containers* foram utilizados para representar as barras de carga, onde são carregados os chassis e as peças (*entities*);
- c) Pontes rolantes: as pontes foram criadas como uma combinação dos objetos *track* e *transporter*. As pontes são representadas por *transporters*, e se movimentam sobre trilhos, os quais são representados pelas *tracks*;
- d) Transportadores lineares, estufas, resfriadores e *buffers* de processo: esses elementos foram representados por *lines*, onde as barras de carga (carregadas e vazias) se movimentam (no caso dos transportadores) ou são depositadas e coletadas (no caso das estufas, resfriadores e *buffers* de processo);
- e) Postos de trabalho: a maior parte dos postos de trabalho foram modelados como *lines*, com exceção da carga de peças e da *rotate machine*, os quais foram modelados a partir de *SingleProcs*;
- f) Tanques e posições do *buffer* de entrada: a representação desses elementos foi feita com *SingleProcs*; e
- g) Parâmetros de processo: para a inserção dos parâmetros de processo foram utilizadas *TableFiles*. A partir desse tipo de objeto foram inseridas as informações referentes a: mix de produção; tempos de processo nos tanques; tempos de processo de estufas e resfriadores; tempos de processo nos postos de trabalho; velocidades das pontes rolantes; e velocidades dos transportadores lineares.

A figura 34 apresenta o *frame* com as tabelas utilizadas para inserção dos parâmetros de processo.

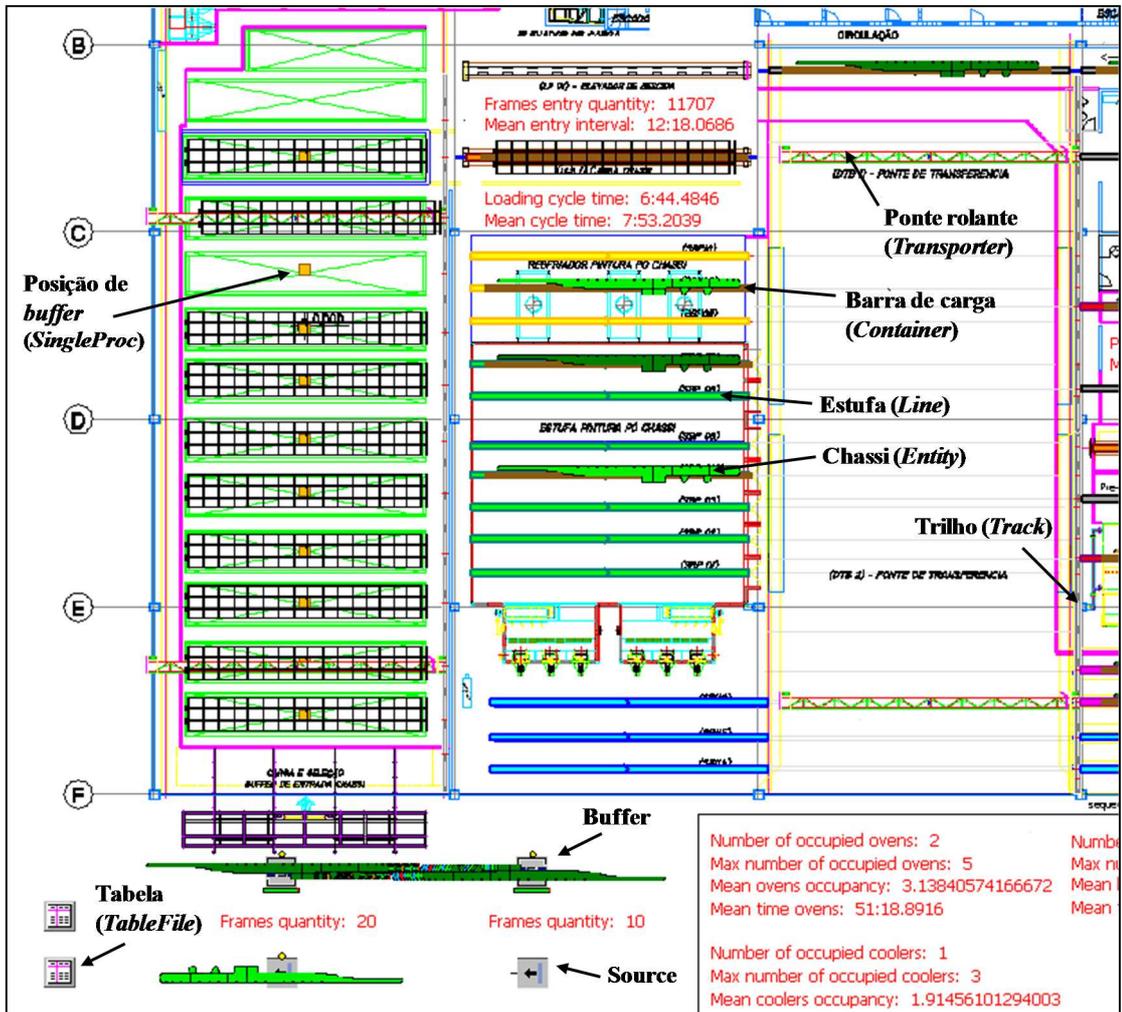
Figura 33 – Frame com as tabelas para inserção dos parâmetros de processo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

A figura 35 ilustra parte dos tipos de objetos empregados no modelo.

Figura 34 – Tipos de objetos empregados no modelo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

4.4.2 Estratégias de movimentação dos objetos de fluxo de material

A movimentação dos objetos é controlada principalmente pelas pontes rolantes. Sobre os trilhos (*tracks*) são utilizados sensores, que indicam a posição dos diferentes elementos (transportadores, postos de trabalho, estufas, resfriadores) em relação ao início do trilho, permitindo a localização dos mesmos por parte das pontes.

No método *sensorControl* está localizada a programação responsável pela movimentação das pontes, bem como das operações de carga e descarga das barras de carga. Parte dos elementos tem um sucessor definido no fluxo (por exemplo, da carga de chassis para o jato de granalha), enquanto outros têm múltiplos possíveis sucessores (por exemplo, da limpeza UF para uma das estufas *e-coat*). Neste segundo caso, o método denominado *getSuccessor* é utilizado para definir o próximo destino da barra de carga. O mesmo método é empregado nas posições onde o próximo destino depende do tipo de produto, como por exemplo no elevador LP02, onde o fluxo a ser seguido depende do processo ao qual o produto é submetido (apenas *e-coat*, *e-coat*+pó ou *e-coat*+líquida). No caso das posições em que os possíveis sucessores são do mesmo tipo, como no exemplo citado da limpeza UF para as estufas *e-coat*, a ordem de utilização dos sucessores segue a ordem numérica empregada na denominação das posições no modelo.

Na figura 36 é apresentado um fragmento do código de programação do método *getSuccessor*.

Figura 35 – Fragmento de código de programação (método *getSuccessor*)

```

----- LP02 to audit (Frames ecoat) or Cooler topcoat to audit (Frames powder) or Liquid painting to audit (Frames liquid) -----
----- if audits occupied ==> to buffer

elseif (station=LP02 and station.cont.cont.name="Frame_Ecoat_NoPlate") or
station=Cooler_Topcoat1 or station=Cooler_Topcoat2 or station=Cooler_Topcoat3 or
station=liquid_painting then

--if all buffers are empty and one audit-place is free --> to the auditplace
if (buffer_topcoat1.occupied=false and buffer_topcoat2.occupied=false and
buffer_topcoat3.occupied=false and buffer_topcoat4.occupied=false and
buffer_topcoat5.occupied=false) and
((audit_topcoat1.occupied=false and audit_topcoat1.res=false) or
(audit_topcoat2.occupied=false and audit_topcoat2.res=false)) then

--set craneQueue for LP02
if station=LP02 then
if CraneQueue_DTB1.yDim < CraneQueue_DTB2.yDim then
LP02.craneQueue:=CraneQueue_DTB1;
else
LP02.craneQueue:=CraneQueue_DTB2;
end;
end;

if audit_topcoat1.occupied=false and audit_topcoat1.res=false then
audit_topcoat1.res:=true;
return audit_topcoat1;
else
audit_topcoat2.res:=true;
return audit_topcoat2;
end;

```

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

Todo o fluxo produtivo segue a estratégia de produção *FIFO* (*first in - first out*). Para isso, as ordens de movimentação são registradas em tabelas de fila (*queueTables*). Assim, quando uma barra de carga está pronta para ser coletada por uma ponte rolante, uma ordem é registrada na tabela. As ordens são atendidas pela ponte na sequência em que são registradas, permitindo que o fluxo siga a estratégia *FIFO*. Alguns movimentos são compartilhados por duas pontes. Neste caso, a ponte com menos chamados na tabela de filas é a que recebe o chamado.

Para o controle de colisão das pontes, vários casos tiveram de ser considerados. De uma forma geral, foi considerada uma distância mínima de segurança entre as pontes e, quando duas pontes estão prestes a colidir, a que iniciou antes seu movimento tem prioridade sobre a outra.

4.4.3 Estratégias dos tempos de processamento

A simulação dos tempos de processamento depende do tipo de objeto. Os elementos do tipo *SingleProc* permitem a configuração do tempo de processo. Já nos elementos representados com *lines*, o tempo de processo foi modelado como um tempo de espera, após a entrada da barra de carga.

As estufas e resfriadores possuem tempos de processo fixos, variando apenas em função do tipo de produto. Já os postos de trabalho, os quais envolvem operações manuais, apresentam tempos de processo variáveis. Para simular essa aleatoriedade, uma distribuição de probabilidades triangular foi empregada. Assim, para cada posto de trabalho foram configurados os valores de limite inferior, moda e limite superior e, a cada barra de carga que entra no posto, o modelo seleciona aleatoriamente um valor, dentro dos limites informados.

4.4.4 Estratégias de utilização dos *buffers* de processo

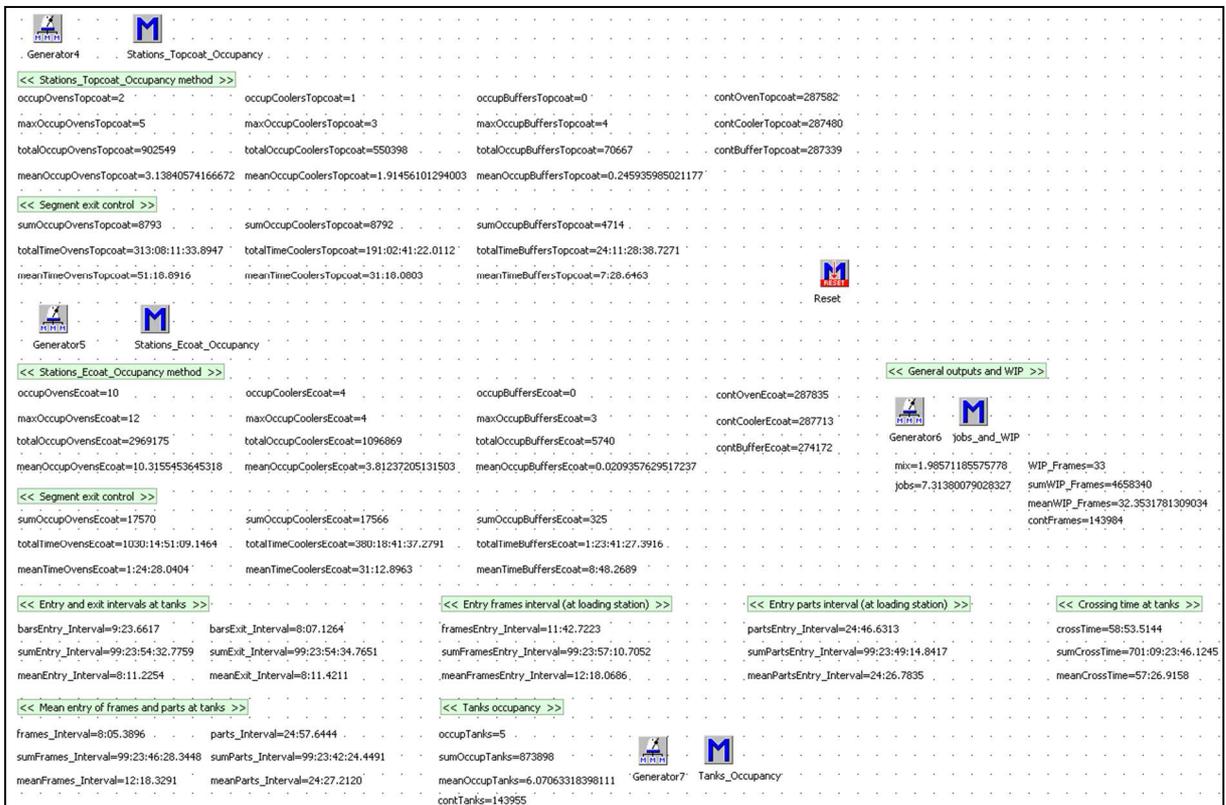
A estratégia empregada no modelo para a utilização dos *buffers* consiste na destinação das barras de carga para os *buffers* apenas quando o destino da barra for uma posição de auditoria, e todas as posições estiverem ocupadas. Nesse caso, a barra é destinada para uma posição de *buffer*. O mesmo procedimento foi adotado nas auditorias *e-coat* e *top-coat*. Seguindo a estratégia *FIFO*, a primeira barra a ser encaminhada para as posições de *buffer* é a primeira a ser removida, assim que uma posição de auditoria é liberada.

4.4.5 Estratégias de coleta de estatísticas

A coleta de estatísticas do modelo foi realizada de duas formas: a partir de estatísticas *default* fornecidas pelo software; e códigos de programação (métodos) criados para coletar dados específicos. Os inúmeros indicadores presentes no modelo são interfaces para a visualização dos valores estatísticos obtidos por esses meios.

A figura 37 apresenta o frame com os elementos utilizados na coleta dos dados estatísticos do modelo.

Figura 36 – Frame com os elementos utilizados para a coleta de dados estatísticos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

4.4.6 Indicadores

Um conjunto de indicadores foi criado para avaliar os resultados do modelo de simulação. Estes indicadores podem ser divididos em 4 grupos: tempos de estações de trabalho; ocupação de estufas, resfriadores e buffers; indicadores da área dos tanques; e indicadores gerais do processo. A seguir são explicitados os indicadores de cada grupo.

- Tempos de estações de trabalho

Em várias estações de trabalho do processo foram inseridos indicadores de tempo de ciclo (*on time*) e tempo de ciclo médio. Estes indicadores foram aplicados nas seguintes estações de trabalho:

- a) carga de chassis;
- b) jato de chassis;
- c) rotate machine;
- d) limpeza fina de chassis;
- e) limpeza UF;
- f) pintura pó de chassis;
- g) descarga de chassis;
- h) carga de peças; e
- i) jato/limpeza fina de peças (tempo total das duas operações).

- Ocupação de estufas, resfriadores e buffers

Foram criados indicadores para os grupos de estufas, resfriadores e buffers, dos processos *e-coat* e *top-coat*. Para cada um destes grupos foram utilizados 4 indicadores:

- a) número de estações ocupadas (*on time*);
- b) número máximo de estações ocupadas;
- c) ocupação média do grupo de estações; e
- d) tempo médio de ocupação das estações.

- Indicadores da área dos tanques

Na área dos tanques foram implementados diversos indicadores. Em relação à entrada de barras de carga na área dos tanques, os seguintes indicadores foram utilizados:

- a) intervalo de entrada de barras (*on time*);
- b) intervalo médio de entrada de barras;
- c) intervalo médio de entrada de barras de chassis;
- d) quantidade de entrada de barras de chassis;
- e) intervalo médio de entrada de barras de peças; e
- f) quantidade de entrada de barras de peças.

Para cada um dos tanques do pré-tratamento, os seguintes tipos de indicadores foram utilizados:

- a) tempo de ciclo no tanque (*on time*);
- b) tempo de ciclo padrão (*on time*): soma dos tempos de descarga, imersão, carga e escorrimento referente ao tipo de produto em processo no tanque;
- c) tempo excedido (*on time*): diferença entre o tempo de ciclo e o tempo de ciclo padrão; e
- d) tempo excedido médio.

Referentes à saída de barras de carga dos tanques, os seguintes indicadores foram utilizados:

- a) intervalo de saída de barras (*on time*);
- b) intervalo médio de saída de barras;
- c) tempo de atravessamento nos tanques (*on time*): tempo levado pela barra de carga para passar pelos 9 tanques do pré-tratamento; e
- d) tempo médio de atravessamento nos tanques.

Ainda foram utilizados 2 indicadores referentes à ocupação dos tanques:

- a) número de tanques ocupados (*on time*); e
- b) ocupação média dos tanques.

- Indicadores gerais do processo

Com relação à entrada e saída de produtos no processo, foram empregados os seguintes indicadores:

- a) quantidade de entrada de chassis na carga;
- b) intervalo médio de entrada de chassis na carga;
- c) quantidade de chassis processados;
- d) intervalo médio de saída de chassis na descarga;
- e) quantidade de entrada de *jobs* de peças na carga;
- f) intervalo médio de entrada de *jobs* de peças na carga;
- g) quantidade de *jobs* de peças processados; e
- h) intervalo médio de saída de *jobs* de peças na descarga.

Referentes à utilização de barras de carga e a trabalho em processo, foram utilizados os seguintes indicadores:

- a) quantidade de barras disponíveis para chassis;
- b) quantidade de barras de chassis em circulação (vazias ou carregadas);
- c) quantidade de barras disponíveis para peças;
- d) quantidade de barras de peças em circulação (vazias ou carregadas);
- e) WIP (*work in process*) médio de chassis; e
- f) WIP (*work in process*) médio de *jobs* de peças.

Como resultados gerais de saída do processo, foram empregados os seguintes indicadores:

- a) taxa de produção de chassis;
- b) taxa de produção de peças;
- c) taxa de produção total: soma das taxas de produção de chassis e de peças; e
- d) mix chassis/peças: relação entre as quantidades de barras de chassis e barras de peças processadas.

4.5 VALIDAÇÃO DO MODELO

Para comprovação de que o modelo de simulação representa de maneira fidedigna o comportamento real do sistema produtivo analisado, foram estabelecidos indicadores que foram analisados pelo grupo envolvido no estudo. Foram avaliados: tempos de estações de trabalho; ocupação de estufas, resfriadores e buffers; indicadores da área dos tanques; e indicadores gerais de processo. Este modelo foi denominado “PEC_Present_Status” e representa o estado real do sistema produtivo em questão.

Modelo: PEC_Present_Status

Data do arquivo: 04/04/2013

Tempo de simulação: 100 dias (24 horas por dia)

A seguir são apresentados os resultados obtidos no modelo de simulação, seguindo a mesma divisão de grupos dos indicadores. São listados os valores de todos os indicadores, excetuando-se os do tipo *on time*.

4.5.1 Tempos de estações de trabalho

No quadro 15 são apresentados os tempos de ciclo médio das estações de trabalho mensuradas. Estes valores são uma resultante gerada pelo modelo de simulação que considera os tempos apresentados no quadro 9 para as estações de trabalho.

Quadro 15 – Tempos de ciclo médio das estações de trabalho

| Posto de trabalho | Tempo de ciclo médio [min:s] |
|------------------------------|------------------------------|
| Carga de chassis | 07:53 |
| Jato de chassis | 10:05 |
| Rotate machine | 10:04 |
| Limpeza fina de chassis | 11:02 |
| Limpeza UF | 07:12 |
| Pintura pó de chassis | 11:42 |
| Descarga de chassis | 07:02 |
| Carga de peças | 22:40 |
| Jato + Limpeza fina de peças | 18:07 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

4.5.2 Ocupação de estufas, resfriadores e buffers

O quadro 16 apresenta os dados de ocupação de estufas, resfriadores e buffers, nos processos *e-coat* e *top-coat*. São listados a quantidade disponível de cada tipo de estação, os resultados de ocupação máxima e ocupação média do conjunto de estações, bem como o tempo médio de ocupação das mesmas.

Quadro 16 – Ocupação de estufas, resfriadores e buffers

| Tipo de estação | Quantidade disponível [estações] | Ocupação máxima [estações] | Ocupação média [estações] | Tempo médio [h:min:s] |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Estufas e-coat | 12 | 12 | 10,32 | 1:24:28 |
| Resfriadores e-coat | 4 | 4 | 3,81 | 0:31:13 |
| Buffers e-coat | 8 | 3 | 0,021 | 0:08:48 |
| Estufas top-coat | 7 | 5 | 3,14 | 0:51:19 |
| Resfriadores top-coat | 3 | 3 | 1,91 | 0:31:18 |
| Buffers top-coat | 5 | 4 | 0,25 | 0:07:29 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

4.5.3 Indicadores da área dos tanques

No quadro 17 são listados os intervalos médios de entrada, saída e atravessamento nos tanques, bem como a ocupação média dos mesmos.

Quadro 17 – Indicadores de entrada, saída e ocupação dos tanques

| Indicador | Valor |
|---|----------------|
| Intervalo médio de entrada de barras (chassis ou peças) | 8:11 [min:s] |
| Intervalo médio de entrada de barras de chassis | 12:18 [min:s] |
| Intervalo médio de entrada de barras de peças | 24:27 [min:s] |
| Tempo médio de atravessamento nos tanques | 57:27 [min:s] |
| Ocupação média dos tanques | 6,07 [tanques] |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

O quadro 18 contém os valores de tempo excedido médio para cada um dos tanques.

Quadro 18 – Tempo excedido médio nos tanques

| Tanque | Tempo excedido médio [min:s] |
|----------------|-------------------------------------|
| Pré-desengraxe | 2:54 |
| Desengraxe | 1:39 |
| Enxágue I | 3:37 |
| Fosfato | 2:24 |
| Enxágue II | 3:42 |
| Enxágue III | 3:28 |
| E-coat | 1:08 |
| Enxágue IV | 3:34 |
| Enxágue V | 4:00 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

4.5.4 Indicadores gerais do processo

No quadro 19 são apresentados os resultados referentes a quantidades processadas e trabalho em processo, nos fluxos de chassis e de peças.

Quadro 19 – Quantidades processadas e em processo

| Indicador | Valor |
|---|--------------|
| Quantidade de chassis processados | 11675 |
| Quantidade de jobs de peças processados | 5879 |
| WIP médio de chassis | 32,35 |
| WIP médio de jobs de peças | 10,66 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

Os tempos de ciclo dos fluxos de chassis e de peças são listados no quadro 20.

Quadro 20 – Tempos de ciclo

| Tempo de ciclo | Tempo [min:s] |
|-----------------------|----------------------|
| Chassis | 12:19 |
| Peças | 24:28 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

Como resultados gerais do processo, são apresentadas no quadro 21 as taxas de produção de chassis, de peças, total e a relação entre as taxas de chassis e de peças.

Quadro 21 – Resultados gerais do processo

| Indicador | Valor |
|-----------------------------|------------------|
| Taxa de produção de chassis | 4,865 [barras/h] |
| Taxa de produção de peças | 2,449 [barras/h] |
| Taxa de produção total | 7,314 [barras/h] |
| Mix chassis/peças | 1,986 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

4.5.5 Conclusões de validação

Os resultados obtidos no modelo indicam uma boa representatividade do processo atual da Endosul-PEC. Os tempos de ciclo encontrados, de 12:19 min para chassis e 24:28 min para peças, estão em acordo com os tempos utilizados na programação da produção da fábrica, que são de 12:00 min para chassis e 24:00 min para peças.

Outro ponto que aponta conformidade com o processo real são os elevados tempos de espera nos tanques, uma vez que estes constituem o recurso convergente do processo.

Uma conclusão importante que pode ser apontada é a sub-capacidade dos resfriadores do processo *e-coat*. Pode-se verificar que a ocupação média (3,81) é bastante próxima da quantidade de resfriadores (4). Além disso, o tempo médio de ocupação do recurso anterior, a estufa *e-coat*, é significativamente superior ao tempo nominal médio. Considerando-se os tempos nominais de estufagem e os percentuais de cada tipo de produto, chega-se a um tempo nominal médio para as estufas *e-coat* de 48:20, enquanto que o tempo médio obtido para as estufas *e-coat* na simulação foi de 1:24:28.

4.6 EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE DO MODELO

Nesta fase do estudo são apresentadas as conclusões obtidas a partir das mudanças propostas em relação ao modelo do estado atual da Endosul-PEC. As mudanças são inicialmente analisadas isoladamente, e depois combinadas em alguns agrupamentos. A discussão dos resultados é baseada nos dados listados na planilha – quadro 22, podendo este ser mais bem visualizado no Apêndice B.

Quadro 22 – Comparação de resultados dos modelos de simulação

| Data: 15/03/2013 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|--|----------------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------------|---|---------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------|
| Tempo de simulação: 100 dias (24 horas por dia) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Modelo | Tanques | | | Ocupação estufas e resfriadores e-coat | | | | WIP | | Quantidades processadas | | Tempo de ciclo | | | Throughput | | Mix |
| | Tempo de atravessamento nos tanques | Ocupação média dos tanques | Tempo de ciclo médio limpeza UF | Ocupação média estufas e-coat | Tempo médio estufas e-coat | Ocupação média resfriadores e-coat | Tempo médio resfriadores e-coat | WIP médio de chassis | WIP médio de jobs de peças | Quantidade de chassis processados | Quantidade de jobs de peças processados | Tempo de ciclo de chassis | Tempo de ciclo de peças | Taxa de produção de chassis | Taxa de produção de peças | Taxa de produção total | Mix chassis/peças |
| 15.03.13_PEC_Present_status | 0:57:31 | 6,08 | 0:07:13 | 10,17 | 1:23:18 | 3,81 | 0:31:13 | 32,35 | 10,61 | 11662 | 5877 | 0:12:19.63 | 0:24:28.10 | 4,859 | 2,449 | 7,308 | 1,984 |
| 15.03.13_PEC_Change_1 | 0:57:29 | 6,07 | 0:07:12 | 9,94 | 1:21:24 | 3,81 | 0:31:13 | 32,23 | 10,54 | 11675 | 5878 | 0:12:18.87 | 0:24:27.74 | 4,865 | 2,449 | 7,314 | 1,986 |
| 15.03.13_PEC_Change_2 | 0:57:30 | 6,08 | 0:07:12 | 10,34 | 1:24:42 | 3,81 | 0:31:13 | 32,35 | 10,68 | 11671 | 5878 | 0:12:18.97 | 0:24:27.70 | 4,863 | 2,449 | 7,312 | 1,985 |
| 15.03.13_PEC_Change_3 | 0:57:50 | 6,09 | 0:07:15 | 5,80 | 0:47:44 | 3,62 | 0:29:47 | 30,62 | 9,24 | 11596 | 5880 | 0:12:23.92 | 0:24:27.59 | 4,832 | 2,450 | 7,282 | 1,972 |
| 15.03.13_PEC_Change_4.1 | 0:58:56 | 6,25 | 0:07:12 | 10,20 | 1:23:29 | 3,81 | 0:31:13 | 32,37 | 10,68 | 11673 | 5879 | 0:12:18.95 | 0:24:27.70 | 4,864 | 2,449 | 7,313 | 1,985 |
| 15.03.13_PEC_Change_4.2 | 0:57:34 | 6,09 | 0:06:57 | 11,22 | 1:31:49 | 3,81 | 0:31:12 | 32,50 | 10,96 | 11689 | 5879 | 0:12:17.95 | 0:24:27.63 | 4,870 | 2,450 | 7,320 | 1,988 |
| 15.03.13_PEC_Change_4.3 | 0:52:42 | 5,33 | 0:07:08 | 6,56 | 0:55:22 | 3,74 | 0:31:35 | 30,59 | 9,39 | 11160 | 5881 | 0:12:52.86 | 0:24:27.05 | 4,650 | 2,450 | 7,100 | 1,898 |
| 15.03.13_PEC_Change_5.1 | 0:54:46 | 5,70 | 0:07:11 | 9,59 | 1:19:11 | 3,80 | 0:31:21 | 32,33 | 10,76 | 11568 | 5850 | 0:12:25.77 | 0:24:34.77 | 4,819 | 2,438 | 7,257 | 1,977 |
| 15.03.13_PEC_Change_5.2 | 0:38:09 | 4,19 | 0:03:38 | 6,75 | 0:50:30 | 4,30 | 0:32:09 | 31,86 | 8,58 | 13327 | 5882 | 0:10:47.31 | 0:24:26.98 | 5,553 | 2,451 | 8,004 | 2,266 |
| 15.03.13_PEC_Change_6 | 0:55:58 | 6,01 | 0:07:03 | 6,17 | 0:49:31 | 4,10 | 0:32:53 | 31,11 | 9,41 | 12032 | 5882 | 0:11:56.94 | 0:24:27.02 | 5,013 | 2,451 | 7,464 | 2,045 |

Mudança 1: Linha pintura pó (chassis) mais rápida
Mudança 2: Redução de tempos de processo nos tanques
Mudança 3: Redução de tempos de processo de estufas e resfriadores
Mudança 4: Uma quarta TTB (ponte rolante) no pré-tratamento
4.1: Primeira distribuição de pontes
4.2: Primeira distribuição de pontes mais redução do tempo de processo na estação ST4
4.3: Segunda distribuição de pontes

Mudança 5: Uma segunda estação de trabalho na saída dos tanques (limpeza UF)
5.1: Somente inclusão da segunda estação de trabalho
5.2: Inclusão da segunda estação, mais substituição de uma estufa e-coat por um resfriador
Mudança 6: Duas estufas e-coat substituídas por resfriadores

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

4.6.1 Mudanças simuladas

- Mudança 1: Linha de pintura pó (chassis) mais rápida

A velocidade do transportador da linha de pintura pó foi aumentada de 0,019 para 0,0225 m/s. Dessa forma, o tempo de ciclo médio da linha foi reduzido de 11:40 min para 10:00, aproximadamente.

- Mudança 2: Redução de tempos de processo nos tanques

Os tempos de imersão nos tanques de desengraxe, fosfato e *e-coat* foram reduzidos em 1 min para todas as receitas (todos os tipos de produtos).

- Mudança 3: Redução de tempos de processo de estufas e resfriadores

Os tempos de processo de estufas e resfriadores foram reduzidos. Tanto para o processo *e-coat* como para o processo *top-coat*, os tempos de estufagem foram reduzidos em 5 min, enquanto que os tempos de resfriamento foram reduzidos em 2:30 min.

- Mudança 4: Uma quarta TTB (ponte rolante) no pré-tratamento

Uma ponte adicional foi criada no pré-tratamento. Algumas configurações de distribuição das pontes foram testadas. Esta distribuição significa os tanques que podem chamar a ponte para carregar a barra e descarregar no tanque seguinte. As configurações testadas são descritas no quadro 23.

- Mudança 5: Uma segunda estação de trabalho na saída dos tanques (limpeza UF)

Uma estação de trabalho adicional (similar à ST4) foi criada na saída da área dos tanques. Portanto, duas estufas *e-coat* tiveram de ser removidas (as duas mais próximas da ST4 no modelo do estado atual).

- Mudança 5.1: sem mudanças adicionais;
- Mudança 5.2: além da segunda estação na saída dos tanques, uma estufa *e-coat* foi substituída por um resfriador. Dessa forma, ao invés de 10 estufas e 4 resfriadores no processo *e-coat*, o modelo tem 9 estufas e 5 resfriadores.

- Mudança 6: Duas estufas *e-coat* substituídas por resfriadores

As duas últimas estufas *e-coat* (11 e 12) foram substituídas por resfriadores. Portanto, ao invés de 12 estufas e 4 resfriadores no processo *e-coat*, o modelo tem 10 estufas e 6 resfriadores.

- Mudança 7: Uma terceira DTB (ponte rolante) na área das estufas e resfriadores *e-coat*

Uma ponte rolante adicional foi criada na área das estufas e resfriadores *e-coat*.

Quadro 23 – Configurações de distribuição das pontes

| Mudança | Ponte | Tanques | Prioridades | Outras mudanças |
|---------|-------|------------|--|--|
| 4.1 | TTB1 | 1, 2 | Não | Não |
| | TTB2 | 3, 4 | | |
| | TTB3 | 5, 6 | | |
| | TTB4 | 7, 8, 9 | | |
| 4.2 | TTB1 | 1, 2 | Não | Redução do tempo de processo da estação ST4, de 5:00-7:00 min para 3:00-5:00 min |
| | TTB2 | 3, 4 | | |
| | TTB3 | 5, 6 | | |
| | TTB4 | 7, 8, 9 | | |
| 4.3 | TTB1 | 1, 2 | Não | Não |
| | TTB2 | 3, 4 | | |
| | TTB3 | 5, 6, 7 | | |
| | TTB4 | 8, 9 | | |
| 4.4 | TTB1 | 1, 2 | Tanque 2: TTB1 Tanque 4: TTB2 | Não |
| | TTB2 | 2, 3, 4 | | |
| | TTB3 | 4, 5, 6 | | |
| | TTB4 | 7, 8, 9 | | |
| 4.5 | TTB1 | 1, 2 | Tanque 2: TTB1 Tanque 4: TTB2 Tanque 7: TTB4 | Não |
| | TTB2 | 2, 3, 4 | | |
| | TTB3 | 4, 5, 6, 7 | | |
| | TTB4 | 7, 8, 9 | | |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

4.7 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

A numeração empregada no nome do modelo se refere à(s) mudança(s) implementada(s). As comparações, exceto nos casos explicitados, são sempre feitas em relação ao modelo do estado atual (PEC_Present_status).

- PEC_Change_1:

A redução do tempo de processo na pintura pó de chassis não implicou em diferenças significativas nos resultados do processo, os quais são similares aos do estado atual.

- PEC_Change_2:

A redução de tempos de processo no pré-tratamento não implicou em diferenças significativas nos resultados do processo, e os resultados obtidos são similares aos do estado atual.

- PEC_Change_3:

A redução de tempos de processo nas estufas e resfriadores não implicou em melhorias nos resultados finais do processo, havendo inclusive um aumento de aproximadamente 7 s no tempo de ciclo de chassis.

Com esta mudança, há uma redução significativa no tempo médio de permanência nas estufas *e-coat*, não ocorrendo mais os elevados tempos de espera observados no estado atual. Entretanto, também ocorre uma redução de 45% na ocupação média das estufas *e-coat* e de 8% no *work-in-process*.

- PEC_Change_4.1:

A primeira distribuição testada para a aplicação de uma quarta ponte rolante no pré-tratamento não implicou em diferenças significativas nos resultados do processo. A diferença mais relevante foi o aumento do tempo médio de atravessamento no pré-tratamento, em 1:35 min.

- PEC_Change_4.2:

Neste modelo, além da primeira distribuição testada para a aplicação de uma quarta ponte rolante no pré-tratamento, foi reduzido o tempo de processo da limpeza UF. Os resultados finais do processo são similares ao estado atual. A diferença mais relevante foi a redução de 15 s no tempo de ciclo médio da limpeza UF (ST4). Porém, também houve um aumento no tempo médio de permanência nas estufas *e-coat*, de aproximadamente 8 min.

- PEC_Change_4.3:

Neste modelo foi testada uma segunda distribuição para a aplicação de uma quarta ponte rolante no pré-tratamento. Houve uma piora significativa nos resultados do processo, com um aumento de aproximadamente 34 s no tempo de ciclo de chassis.

Observa-se uma redução significativa no tempo médio de permanência nas estufas *e-coat*, não ocorrendo mais os elevados tempos de espera observados no estado atual, e uma redução de 04:42 min no tempo médio de atravessamento no pré-tratamento. Entretanto, também ocorre uma redução de 12% na ocupação média dos tanques, de 38% na ocupação média das estufas *e-coat* e de 7% no *work-in-process*.

- PEC_Change_4.4:

A terceira distribuição testada para a aplicação de uma quarta ponte rolante no pré-tratamento não implicou em diferenças significativas nos resultados do processo, os quais são similares aos do estado atual.

- PEC_Change_4.5:

A quarta distribuição testada para a aplicação de uma quarta ponte rolante no pré-tratamento não implicou em diferenças significativas nos resultados do processo, os quais são similares aos do estado atual.

Apesar das pequenas diferenças entre a primeira, a terceira e a quarta distribuições testadas, a quarta distribuição foi a que apresentou os melhores resultados. Portanto, esta foi a distribuição escolhida para as combinações de mudanças realizadas, e cujos resultados são apresentados na sequência.

- PEC_Change_5.1:

A adoção de uma segunda estação de trabalho na saída dos tanques (limpeza UF) não implicou em melhorias nos resultados finais do processo, havendo inclusive um aumento de aproximadamente 9 s no tempo de ciclo de chassis.

O resultado mais relevante refere-se ao tempo de ciclo médio na limpeza UF, que permaneceu igual, mesmo com dois postos de trabalho. O tempo médio de cada posto foi igual à aproximadamente o dobro do tempo do único posto do estado atual.

- PEC_Change_5.2:

Neste modelo, além da adoção de uma segunda estação de trabalho na saída dos tanques (limpeza UF), uma estufa *e-coat* foi substituída por um resfriador. Esta mudança resultou em uma redução de 1:31 min no tempo de ciclo de chassis e um aumento de 14% no throughput de chassis.

Observou-se também uma redução de 18:17 min no tempo médio de atravessamento no pré-tratamento, uma redução do tempo de ciclo médio na limpeza UF em 03:34 min e a eliminação dos elevados tempos de espera nas estufas *e-coat*.

Entretanto, também foi observada uma redução de 31% na ocupação média dos tanques e de 35% na ocupação média das estufas *e-coat*.

- PEC_Change_6:

A substituição de duas estufas *e-coat* por resfriadores resultou em uma redução de aproximadamente 22 s no tempo de ciclo de chassis e um aumento de 3% no throughput de chassis.

Nos demais indicadores, as diferenças mais significativas são a eliminação dos elevados tempos de espera nas estufas *e-coat*, a redução da ocupação média das estufas *e-coat* em 40%, e a redução de 6% no *work-in-process*.

- PEC_Changes_1+3:

Esta combinação de mudanças apresentou resultados similares aos obtidos no modelo "PEC_Change_3".

- PEC_Changes_2+3:

Neste modelo, os resultados encontrados são similares aos obtidos no modelo "PEC_Change_3".

- PEC_Changes_1+2+3:

Esta combinação de mudanças apresentou resultados similares aos obtidos no modelo "PEC_Change_3".

- PEC_Changes_2+4.5:

Esta combinação de mudanças não implicou em diferenças significativas nos resultados do processo, os quais são similares aos do estado atual.
- PEC_Changes_2+5.1

Os resultados obtidos nesta combinação de mudanças são similares aos obtidos no modelo "PEC_Change_5.1".
- PEC_Changes_4.5+5.1:

Esta combinação de mudanças apresentou resultados similares aos obtidos no modelo "PEC_Change_5.1".
- PEC_Changes_2+4.5+5.1:

Neste modelo, os resultados encontrados são similares aos obtidos no modelo "PEC_Change_5.1".
- PEC_Changes_3+5.1

Nesta combinação de mudanças, a inserção da mudança 3 implicou em melhora significativa de resultados em relação ao modelo "PEC_Change_5.1" e, conseqüentemente, ao estado atual.

Na comparação com o estado atual, verifica-se uma redução de aproximadamente 01:18 min no tempo de ciclo de chassis, a redução de 10:03 min no tempo médio de atravessamento no pré-tratamento e de 42 s no tempo de ciclo médio na limpeza UF, e um aumento de 12% no throughput de chassis.

Ainda em relação ao estado atual, houve redução de 14% na ocupação média dos tanques, e de 7% na ocupação média das estufas *e-coat*.
- PEC_Changes_3+4.5+5.1:

Os resultados obtidos nesta combinação de mudanças são similares aos obtidos no modelo "PEC_Changes_3+5.1". A diferença mais relevante é a redução no tempo de ciclo médio na limpeza UF, de aproximadamente 01:45 min.

- PEC_Changes_2+3+5.1
Nesta combinação de mudanças, foram encontrados resultados similares aos obtidos no modelo “PEC_Changes_3+5.1”.
- PEC_Changes_2+3+4.5+5.1:
Esta combinação de mudanças apresentou resultados similares aos obtidos no modelo "PEC_Changes_3+5.1".
- PEC_Changes_1+2+3+5.1
Os resultados encontrados nesta combinação de mudanças são similares aos obtidos no modelo “PEC_Changes_3+5.1”.
- PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.1:
Esta combinação de mudanças apresentou resultados similares aos obtidos no modelo "PEC_Changes_3+5.1".
- PEC_Changes_2+5.2
Nesta combinação de mudanças foram observados melhores resultados em relação ao modelo "PEC_Change_5.2" e, conseqüentemente, ao estado atual.
Na comparação com o estado atual, verifica-se uma diminuição do tempo de ciclo de chassis de 1:54 min, uma redução de 18:35 min no tempo médio de atravessamento no pré-tratamento e de 3:37 min no tempo de ciclo médio na limpeza UF, e um aumento de 18% no throughput de chassis.
Ainda em relação ao estado atual, houve redução de 30% na ocupação média dos tanques, de 32% na ocupação média das estufas *e-coat*, e de 8% no *work-in-process*.
- PEC_Changes_4.5+5.2:
Neste modelo, não houve melhora nos resultados em relação ao modelo "PEC_Change_5.2". Observou-se inclusive uma piora nos resultados, com aumento de aproximadamente 13 s no tempo de ciclo de chassis, e de 07:38 min no tempo médio de atravessamento no pré-tratamento.

- PEC_Changes_2+4.5+5.2:

Os resultados encontrados nesta combinação de mudanças são similares aos obtidos no modelo "PEC_Changes_2+5.2". As diferenças mais relevantes são a redução de 7:34 min no tempo médio de atravessamento no pré-tratamento e de 25% na ocupação média dos tanques.

- PEC_Changes_3+5.2

Neste modelo, os resultados encontrados são similares aos obtidos no modelo "PEC_Change_5.2". A diferença mais relevante é a redução de aproximadamente 6 min no tempo médio de ocupação das estufas *e-coat*.

- PEC_Changes_3+4.5+5.2:

Esta combinação de mudanças apresentou resultados similares aos obtidos no modelo "PEC_Changes_4.5+5.2". A diferença mais relevante é a redução de aproximadamente 6 min no tempo médio de ocupação das estufas *e-coat*.

- PEC_Changes_2+3+5.2

Neste modelo, os resultados encontrados são similares aos obtidos no modelo "PEC_Change_2+5.2". As diferenças mais relevantes são a redução de aproximadamente 6 min no tempo médio de ocupação das estufas *e-coat* e de aproximadamente 4 min no tempo médio de ocupação dos resfriadores *e-coat*.

- PEC_Changes_2+3+4.5+5.2:

Esta combinação de mudanças apresentou resultados similares aos obtidos no modelo "PEC_Changes_2+4.5+5.2". A diferença mais relevante é a redução de aproximadamente 6 min no tempo médio de ocupação das estufas *e-coat*.

- PEC_Changes_1+2+3+5.2

Os resultados encontrados nesta combinação de mudanças são similares aos obtidos no modelo "PEC_Changes_2+3+5.2".

- PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.2:

Esta combinação de mudanças apresentou resultados similares aos obtidos no modelo "PEC_Changes_2+3+4.5+5.2".

- PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.2+7

Neste modelo foi testada a 7ª mudança, que consistiu na inclusão de uma terceira ponte rolante na área de estufas e resfriadores *e-coat*. Esta mudança não foi testada de forma isolada, devido à dificuldade de programação do modelo com as três pontes. Portanto, foi feita a opção pelo teste apenas no modelo completo, ou seja, com todas as mudanças em conjunto.

Porém, os resultados encontrados neste modelo são similares aos obtidos no modelo "PEC_Changes_2+3+4.5+5.2", o que indica que não houve ganhos no processo com a inclusão da terceira ponte.

Como pode ser observado nas conclusões parciais, diversos modelos apresentaram resultados semelhantes, o que indica a preponderância de algumas mudanças em relação a outras.

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, os tempos de ciclo de chassis referentes a cada modelo estão listados no quadro 24, e agrupados por semelhança de resultado.

Analisando-se as mudanças realizadas de forma isolada (mudanças 1, 2, 3, 4x, 5.1 e 6), verifica-se que todas apresentaram resultados iguais ou piores aos do estado atual. A exceção é a mudança 6, onde duas estufas *e-coat* foram substituídas por resfriadores, o que resultou em uma redução de aproximadamente 22 s no tempo de ciclo médio de chassis.

Este resultado está em concordância com uma das principais conclusões obtidas no modelo do estado atual, onde foi observada a sub-capacidade dos resfriadores *e-coat*. Isso também pode ser observado nos bons resultados obtidos com a mudança 5.2, a qual constitui uma combinação das mudanças 5.1 e 6, pois, além da inserção de uma segunda estação de trabalho na limpeza UF, também contempla a substituição de uma estufa *e-coat* por um resfriador.

Com relação à inclusão de pontes rolantes adicionais no processo, pode-se concluir que a inclusão de uma quarta ponte rolante no pré-tratamento (mudanças 4.x) não trouxe resultados positivos para o processo. Comparando-se os diversos modelos com as mesmas mudanças e com/sem a mudança 4.5 (inclusão da quarta ponte no pré-tratamento), verifica-se que os resultados são sempre iguais ou maiores para o modelo com a mudança 4.5, como pode ser observado na comparação entre os resultados dos modelos "PEC_Change_5.2" e "PEC_Changes_4.5+5.2".

Quadro 23 – Resultados de tempo de ciclo de chassis

| Modelo | Tempo de ciclo de chassis | Modelo | Tempo de ciclo de chassis |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| PEC_Present_status | 0:12:18.78 | PEC_Changes_3+5.1 | 0:11:00.98 |
| PEC_Change_1 | 0:12:20.51 | PEC_Changes_3+4.5+5.1 | 0:11:01.52 |
| PEC_Change_2 | 0:12:20.06 | PEC_Changes_2+3+5.1 | 0:11:01.91 |
| PEC_Change_3 | 0:12:25.60 | PEC_Changes_2+3+4.5+5.1 | 0:11:02.97 |
| PEC_Change_4.1 | 0:12:21.00 | PEC_Changes_1+2+3+5.1 | 0:11:01.28 |
| PEC_Change_4.2 | 0:12:18.06 | PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.1 | 0:11:03.35 |
| PEC_Change_4.4 | 0:12:20.03 | | |
| PEC_Change_4.5 | 0:12:19.27 | PEC_Changes_4.5+5.2 | 0:11:00.11 |
| PEC_Change_5.1 | 0:12:27.28 | PEC_Changes_3+4.5+5.2 | 0:11:00.14 |
| PEC_Changes_1+3 | 0:12:24.44 | | |
| PEC_Changes_2+3 | 0:12:25.19 | PEC_Change_5.2 | 0:10:47.17 |
| PEC_Changes_1+2+3 | 0:12:24.78 | PEC_Changes_3+5.2 | 0:10:47.29 |
| PEC_Changes_2+4.5 | 0:12:19.29 | | |
| PEC_Changes_2+5.1 | 0:12:21.41 | PEC_Changes_2+5.2 | 0:10:24.52 |
| PEC_Changes_4.5+5.1 | 0:12:25.68 | PEC_Changes_2+4.5+5.2 | 0:10:24.57 |
| PEC_Changes_2+4.5+5.1 | 0:12:27.64 | PEC_Changes_2+3+5.2 | 0:10:24.14 |
| | | PEC_Changes_2+3+4.5+5.2 | 0:10:24.60 |
| PEC_Change_4.3 | 0:12:52.89 | PEC_Changes_1+2+3+5.2 | 0:10:24.81 |
| | | PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.2 | 0:10:24.59 |
| PEC_Change_6 | 0:11:56.82 | PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.2+7 | 0:10:28.45 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

Da mesma forma, a inclusão de uma terceira ponte rolante na área das estufas e resfriadores *e-coat* (mudança 7) não implicou em melhores resultados para o processo. Na comparação entre os resultados dos modelos “PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.2” e “PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.2+7”, verifica-se inclusive um aumento de quase 4 s no tempo de ciclo do segundo modelo.

É interessante observar que todos os modelos com tempos iguais ou inferiores à faixa de tempo de ciclo de 11 min apresentam ou a mudança 5.1 ou a mudança 5.2. Esse resultado indica que a inclusão de uma segunda estação de trabalho na limpeza UF implicou em melhores resultados para o processo, desde que em combinação com outras mudanças. No caso da mudança 5.1, verifica-se que a combinação com a mudança 3 (redução dos tempos de processo

de estufas e resfriadores) possibilitou a redução do tempo de ciclo para 11 min. Como foi observado anteriormente, o modelo 5.1, com a inclusão da segunda estação de trabalho de forma isolada, não apresentou resultados positivos, e o tempo de ciclo médio na limpeza UF permaneceu o mesmo do estado atual. Já no modelo 5.2, a inclusão da segunda estação de trabalho é combinada com a substituição de uma estufa *e-coat* por um resfriador.

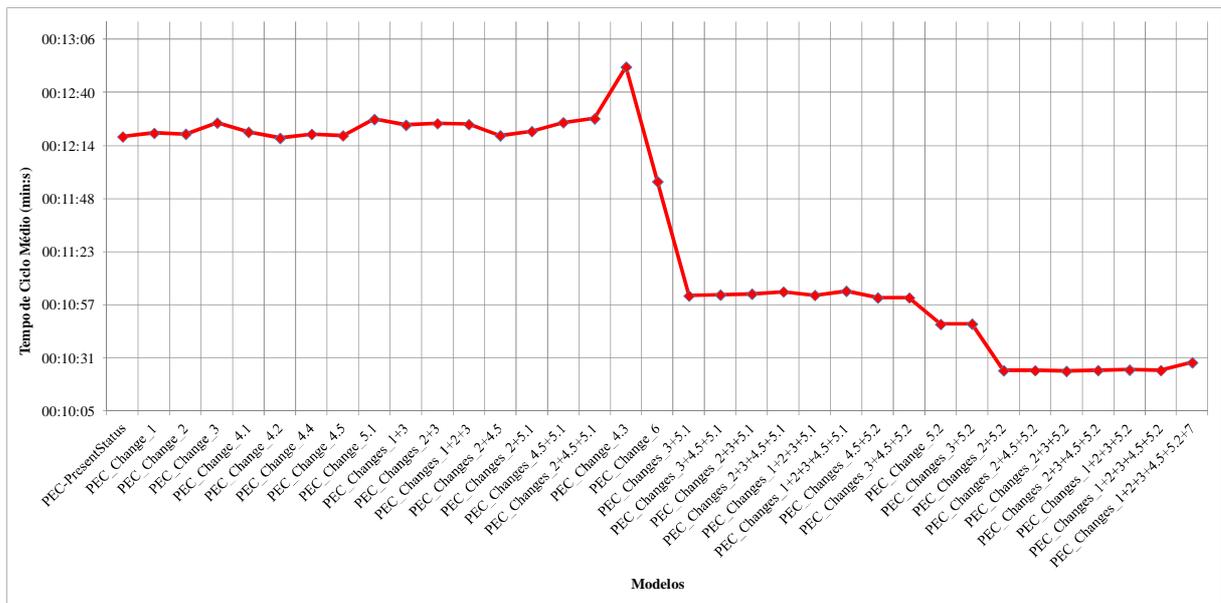
Outra mudança que possibilitou melhores resultados foi a mudança 2, ou seja a redução de tempos de processo nos tanques do pré-tratamento. Comparando-se os resultados dos modelos “PEC_Change_5.2” e “PEC_Changes_2+5.2”, verifica-se que a inclusão da mudança 2 resultou em uma redução de aproximadamente 23 s no tempo de ciclo.

Fazendo-se uma análise global dos resultados do quadro 24, verifica-se que há quatro faixas de valores de tempo de ciclo, menores que o valor do estado atual:

- a) 11:56 min: tempo obtido com a mudança 6, ou seja, a substituição de duas estufas *e-coat* por resfriadores;
- b) 11:00 min: embora este resultado tenha sido obtido em diversas combinações, verifica-se que apenas as mudanças 3 (redução dos tempos de processo de estufas e resfriadores) e 5.1 (inserção de uma segunda estação de trabalho na limpeza UF) são suficientes (modelo “PEC_Changes_3+5.1”). Há ainda dois modelos com a mudança 5.2 e resultados nesta faixa de tempo, mas que são decorrentes de uma piora de resultados em função da combinação com a mudança 4.5;
- c) 10:47 min: tempo de ciclo obtido com a mudança 5.2 (inclusão da segunda estação de trabalho combinada com a substituição de uma estufa *e-coat* por um resfriador);
- d) 10:24 min: ainda que este resultado tenha sido observado em diversas combinações, verifica-se que as mudanças 2 (redução de tempos de processo nos tanques do pré-tratamento) e 5.2 são as determinantes (modelo “PEC_Changes_2+5.2”).

O gráfico apresentado na figura 38 apresenta a evolução dos resultados de tempo de ciclo considerando as modificações propostas. Nele podem ser observadas as quatro faixas de valores de tempos de ciclo médio citadas (aproximadamente 11:56 min; 11:00 min; 10:47 min; e 10:24 min).

Figura 37 – Gráfico dos modelos simulados em relação ao tempo de ciclo médio



Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

Com base nos resultados encontrados nos diversos modelos implementados, podem ser apontadas como conclusões pontuais:

- Os principais gargalos do processo atualmente são as estações de resfriamento da linha *e-coat*, a estação de trabalho limpeza UF e a área de pré-tratamento;
- A inclusão de uma quarta ponte rolante no pré-tratamento não trouxe ganhos significativos ao processo; e
- O mesmo se aplica à inclusão de uma terceira ponte rolante na área das estufas e resfriadores *e-coat*, onde também não foram observados resultados positivos.

Ainda com base nos resultados obtidos a partir dos modelos, e das correlações estabelecidas, pode-se definir três patamares de redução do tempo de ciclo de chassis, a partir de mudanças no processo. O quadro 24 lista as mudanças determinantes, a redução do tempo de ciclo de chassis e o aumento do *throughput* de chassis resultantes da(s) mesma(s).

Esses resultados apresentam opções para a tomada de decisão com relação à melhor solução de modificações para aumento de capacidade. Percebe-se, em tempo, que combinações intermediárias, ou seja, com menor número de pontos modificados combinados, já leva a patamares semelhantes de aumento de capacidade, fato que oportuniza a redução do investimento empregado.

Quadro 24 – Mudanças determinantes para redução do tempo de ciclo

| Mudanças | Redução do tempo de ciclo de chassis | Aumento do throughout de chassis |
|--|---|---|
| redução dos tempos de processo de estufas e resfriadores, e inserção de uma segunda estação de trabalho na limpeza UF | 78 s | 12% |
| inclusão de uma segunda estação de trabalho na limpeza UF, combinada com a substituição de uma estufa e-coat por um resfriador | 91 s | 14% |
| inclusão de uma segunda estação de trabalho na limpeza UF, combinada com a substituição de uma estufa e-coat por um resfriador e a redução de tempos de processo nos tanques do pré-tratamento | 114 s | 18% |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

4.8 RESULTADOS FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Relembrando o quadro 1 deste trabalho, que apresenta o déficit de 18% de capacidade em relação à demanda futura de 130 barras de carga por dia, a pesquisa-ação aplicando a simulação de produção neste sistema produtivo apresentou a comprovação, assim como a combinação ideal de modificações, para que este novo patamar de produção seja alcançado.

Comprovou-se, com o último quadro deste trabalho (quadro 24) uma opção ideal que promove o aumento dos mesmos 18% demandados no início do trabalho.

Complementarmente, foi feita uma estimativa de investimento para cada uma das mudanças propostas, sendo apresentadas no quadro 25. A intenção foi avaliar financeiramente a importância de cada uma das propostas de modificação, atuando como orientação complementar para a tomada de decisão.

Quadro 25 – Valores de investimento das mudanças propostas

| Mudança | Descrição | Implicações de Investimento | Valor de Investimento (em Milhões de R\$) |
|---------|--|--|---|
| 1 | Linha de pintura pó (chassis) mais rápida | Ampliação da cabine de pintura pó | 1 |
| 2 | Redução de tempos de processo nos tanques | Estruturação dos equipamentos para aplicação do frame-coat + nanocerâmico | 1 |
| 3 | Redução de tempos de processo de estufas e resfriadores | Estruturação dos equipamentos para aplicação do pó baixa cura | 0,1 |
| 4 | Uma quarta TTB (ponte rolante) no pré-tratamento | Construção de uma nova ponte no pré-tratamento | 1,5 |
| 5.1 | Uma segunda estação de trabalho na saída dos tanques (limpeza UF) | Corte de 2 posições de estufa e construção de 1 estação de trabalho | 0,5 |
| 5.2 | Uma segunda estação de trabalho na saída dos tanques (limpeza UF) + 1 estufa e-coat substituída por 1 resfriador | Corte de 2 posições de estufa e construção de 1 estação de trabalho + corte de 1 posição de estufa e construção de 1 posição de resfriamento | 1 |
| 6 | 2 estufas e-coat substituídas por 2 resfriadores | Corte de 2 posições de estufas e construção de 2 posições de resfriamento | 1 |
| 7 | Uma terceira DTB (ponte rolante) na área das estufas e resfriadores e-coat | Construção de uma nova ponte na área das estufas e resfriadores e-coat | 1 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

Considerando as combinações propostas, os investimentos totais são vislumbrados no quadro 26. Nesse quadro são considerados os valores individuais de investimento observados no quadro 25 aliados às combinações de modificações propostas. O quadro 26 possibilita uma análise de custos totais de investimento em relação ao ganho no tempo de ciclo médio dos chassis.

Quadro 26 – Valores de investimento para os modelos simulados

| Modelo | Tempo de ciclo de chassis | Custo TOTAL (em Mi de R\$) | Modelo | Tempo de ciclo de chassis | Custo TOTAL (em Mi de R\$) |
|-----------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| PEC_Present_status | 0:12:18.78 | 0 | PEC_Changes_3+5.1 | 0:11:00.98 | 0,6 |
| PEC_Change_1 | 0:12:20.51 | 1 | PEC_Changes_3+4.5+5.1 | 0:11:01.52 | 2,1 |
| PEC_Change_2 | 0:12:20.06 | 1 | PEC_Changes_2+3+5.1 | 0:11:01.91 | 1,6 |
| PEC_Change_3 | 0:12:25.60 | 0,1 | PEC_Changes_2+3+4.5+5.1 | 0:11:02.97 | 3,1 |
| PEC_Change_4.1 | 0:12:21.00 | 1,5 | PEC_Changes_1+2+3+5.1 | 0:11:01.28 | 2,6 |
| PEC_Change_4.2 | 0:12:18.06 | 1,5 | PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.1 | 0:11:03.35 | 4,1 |
| PEC_Change_4.4 | 0:12:20.03 | 1,5 | | | |
| PEC_Change_4.5 | 0:12:19.27 | 1,5 | PEC_Changes_4.5+5.2 | 0:11:00.11 | 2,5 |
| PEC_Change_5.1 | 0:12:27.28 | 0,5 | PEC_Changes_3+4.5+5.2 | 0:11:00.14 | 2,6 |
| PEC_Changes_1+3 | 0:12:24.44 | 1,1 | | | |
| PEC_Changes_2+3 | 0:12:25.19 | 1,1 | PEC_Change_5.2 | 0:10:47.17 | 1 |
| PEC_Changes_1+2+3 | 0:12:24.78 | 2,1 | PEC_Changes_3+5.2 | 0:10:47.29 | 1,1 |
| PEC_Changes_2+4.5 | 0:12:19.29 | 2,5 | | | |
| PEC_Changes_2+5.1 | 0:12:21.41 | 1,5 | PEC_Changes_2+5.2 | 0:10:24.52 | 2 |
| PEC_Changes_4.5+5.1 | 0:12:25.68 | 2 | PEC_Changes_2+4.5+5.2 | 0:10:24.57 | 3,5 |
| PEC_Changes_2+4.5+5.1 | 0:12:27.64 | 3 | PEC_Changes_2+3+5.2 | 0:10:24.14 | 2,1 |
| | | | PEC_Changes_2+3+4.5+5.2 | 0:10:24.60 | 3,6 |
| PEC_Change_4.3 | 0:12:52.89 | 1,5 | PEC_Changes_1+2+3+5.2 | 0:10:24.81 | 3,1 |
| | | | PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.2 | 0:10:24.59 | 4,6 |
| PEC_Change_6 | 0:11:56.82 | 1 | PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.2+7 | 0:10:28.45 | 5,6 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

Com base nos resultados das melhores combinações aliados aos valores de investimento, é apresentado o quadro 27.

A condição proposta pela empresa, antes da análise de simulação e com base apenas no conhecimento dos especialistas no sistema produtivo em questão, era para que fossem executados todos os investimentos propostos. Sendo esta uma condição importante para que se atingisse a nova condição de capacidade que atenderia a demanda futura proposta.

Contudo, estas modificações eram baseadas em conhecimentos empíricos dos especialistas da fábrica, sem confirmação científica.

Quadro 27 – Melhores investimentos

| Mudança | Descrição | Redução do tempo de ciclo de chassis | Aumento do throughout de chassis | Investimento (Mi de R\$) |
|-------------------|--|---|---|---------------------------------|
| PEC_Changes_3+5.1 | redução dos tempos de processo de estufas e resfriadores, e inserção de uma segunda estação de trabalho na limpeza UF | 78 s | 12% | 0,6 |
| PEC_Changes_5.2 | inclusão de uma segunda estação de trabalho na limpeza UF, combinada com a substituição de uma estufa e-coat por um resfriador | 91 s | 14% | 1 |
| PEC_Changes_2+5.2 | inclusão de uma segunda estação de trabalho na limpeza UF, combinada com a substituição de uma estufa e-coat por um resfriador e a redução de tempos de processo nos tanques do pré-tratamento | 114 s | 18% | 2 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

Sendo assim, ante um investimento de 5,6 Milhões de Reais (seis modificações), recomenda-se a execução de apenas duas modificações (2 e 5.2) que geram o mesmo ganho, mas com um custo de 2 Milhões de Reais.

CONCLUSÃO

O presente trabalho estudou, estruturou e aplicou uma metodologia relacionada à utilização da simulação computacional na tomada de decisão e no planejamento de modificações de um sistema produtivo de pinturas automotivas.

Esta aplicação mostrou-se de grande valia para a análise de resultados e orientação para tomada de decisão acerca de modificações na fábrica. Modificações essas que podem ser analisadas separadamente e de forma combinada, ainda na fase de planejamento, fato que ratifica e dá segurança na tomada de decisão com relação às estratégias de produção.

Relembrando os objetivos específicos propostos nesta dissertação:

- a) Estruturar o modelo do processo produtivo identificando o fluxo de produção;
- b) Identificar as etapas necessárias para a simulação computacional;
- c) Aplicar o modelo de simulação utilizando o *software Tecnomatix Plant Simulation* em um processo de produção envolvendo pinturas automotivas e validar sua aplicação;
- d) Propor modificações no sistema produtivo para aumento da capacidade e testá-las através da simulação computacional;
- e) Avaliar os resultados obtidos e definir a solução para o aumento de capacidade; e
- f) Fomentar a aplicação da simulação computacional no processo decisório.

Todos os objetivos supracitados foram alcançados, sendo que os mesmos são apresentados como cerne da pesquisa-ação proposta e utilizados na estruturação do trabalho.

Com relação ao questionamento que baliza o problema de pesquisa: como a simulação computacional pode ser utilizada como ferramenta para auxiliar na tomada de decisão no planejamento de uma modificação em um processo produtivo de pinturas automotivas? A evolução da resolução do problema aconteceu com as discussões e reuniões entre as pessoas envolvidas no processo, gerando por meio das ideias de modificações inseridas no modelo de simulação computacional, conclusões que foram convergindo para uma solução considerada ideal pelos participantes. Quanto as etapas que foram planejadas e seguidas no projeto de simulação, elas foram apresentadas na figura 29.

Este trabalho apresenta resultados positivos, pois aplica uma metodologia estruturada para a utilização da simulação computacional, e os resultados gerados pelo trabalho apontam ganhos haja vista que não apenas comprovou cientificamente a obtenção da capacidade

proposta, como mostrou que a mesma pode ser obtida com um valor menor de investimento, conforme mostrado no quadro 28.

Quadro 28 – Comparação entre as mudanças propostas antes e depois da simulação

| Proposta | Mudanças | Investimento Total (Mi de R\$) | Aumento de Capacidade |
|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Antes da simulação | PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.2+7 | 5,6 | 18% |
| Depois da simulação | PEC_Changes_2+5.2 | 2 | 18% |
| Ganho em economia de investimento → | | 3,6 | |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2013.

Concluindo, foi encontrada por meio da simulação uma proposta que proporciona os 18% necessários de aumento de capacidade, contudo utilizando apenas 36% do investimento proposto inicialmente, ou seja, gerando uma economia de 64% de recursos, ou 3,6 milhões de reais.

Neste contexto, haja vista as conclusões acima relatadas, o trabalho obteve êxito em sua proposta. Sendo que, como sequência, poderá ser estruturada uma atualização da metodologia de trabalho utilizada para o emprego da simulação computacional na análise de melhorias de projetos de fábrica. Propostas de artigos científicos, que estão apresentados nos apêndices C e D, foram gerados deste trabalho, sendo relacionados à utilização da simulação computacional, e a análise de incertezas na medição de tempos nos postos de trabalho. Em tempo, outros estudos periféricos ou derivados deste trabalho ainda podem ser desenvolvidos, tais como: a utilização da simulação no planejamento de produção, e a utilização da simulação nos postos de trabalho com operações manuais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANGSOW, S. **Manufacturing simulation with plant simulation and Simtalk**. Berlin: Springer, 2010.

BANKS, J. **Handbook of simulation**. [S.I.]: John Wiley & Sons, Inc., 1998.

BARRONIO, S. **Desenvolvimento de modelos de simulação computacional para análise e melhoria de sistemas produtivos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BATEMAN, R. E. et al. **A simulação: aprimorando os sistemas**. São Paulo: Belge, 1999.

BERGUE, L. X. **Análise das potencialidades do uso da ferramenta de simulação computacional em operações logísticas: estudo de caso em um Armazém Geral**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BORGES, M. A. V. **Análise da potencialidade de sinergia entre o pensamento sistêmico e a simulação computacional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

CARR, W. Philosophy, methodology and action research. **Journal of Philosophy of Education**. v. 40, n. 4, p. 421-435, 2006.

CASSEL, R. A. **Desenvolvimento de uma abordagem para a divulgação da simulação no setor calçadista gaúcho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

CASTILHO, M. R. **O uso da simulação computacional como ferramenta de auxílio à tomada de decisão: aplicação em uma empresa de papelão ondulado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

CHUNG, C. A. **Simulation modeling handbook – a practical approach**. Florida: CRC Press LLC, 2004.

CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração da Produção e de Operações**. São Paulo. Atlas, 2005.

COSTA, L. F. C. da. **O uso da simulação computacional como ferramenta de análise: um estudo de caso em empresa de bronzeamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

COUGHLAN, P.; COGHLAN, D. Action research for operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 220-240, 2002.

ELECTROCOATING. **A guidebook for finishers**. 1 ed. Cincinnati: Electrocoat Association, 2002.

FESPPR – Fundação de estudos sociais do Paraná. **Tipos de Processos**. Disponível em: <<http://www.fesppr.br/~rodrigo/TIPOS%20DE%20PROCESSOS.ppt>> Acesso em: 23/04/2009.

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

HEIZER, J.; RENDER, B. **Administração de operações**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2001.

KOUSKOURAS, K. G.; GEORGIU, A. C. A discrete event simulation model in the case of managing a software project. **European Journal of Operational Research**, 181: 374-389, 2007.

LANDMANN, R. **Um modelo heurístico para programação da produção em fundições com utilização da lógica fuzzy**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

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

MACHLINE, C. Evolução da administração da produção no Brasil. **Revista de Administração de Empresas**, v 34, n. 3, p. 91-101, 1994.

MOREIRA, D. A. **Administração da produção e operações**. [S.I.]: Pioneira, 2001.

OISHI, M. **TIPS** – técnicas integradas na produção e serviços. São Paulo: Pioneira, 1995.

PACHECO, R. F.; SANTORO, M. C. Proposta de classificação hierarquizada dos modelos de solução para o problema de job shop scheduling. **Gestão & Produção**, v.6, n.1, p. 1-15, 1999.

PITTSBURGH PAINT GLASS (PPG). **Industrial Electrocoat Reference Manual**. 1 edição. Canadá: PPG, 2011.

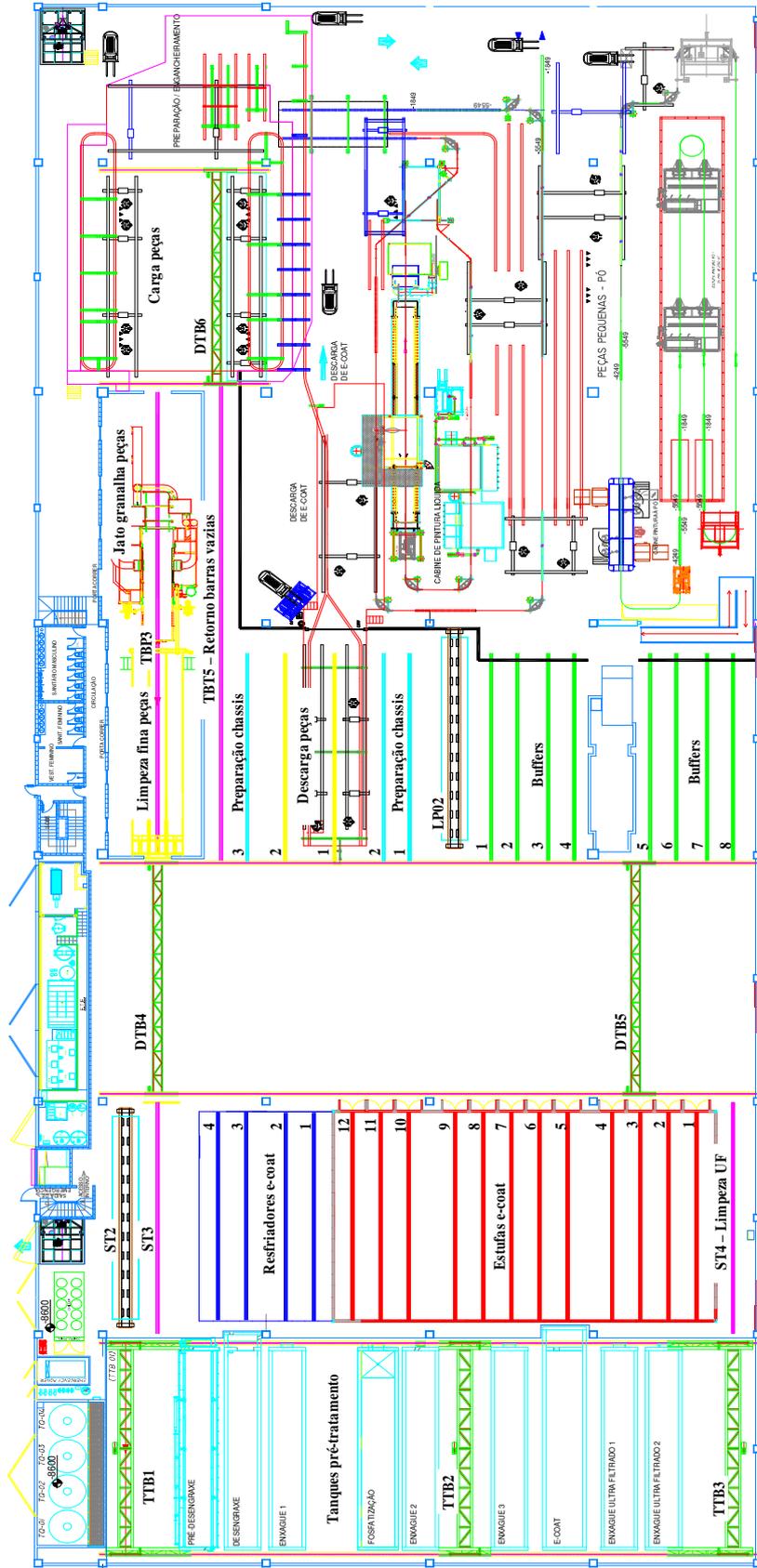
PRADO, D. S. **Teoria das filas e da simulação**. Série Pesquisa Operacional, vol. 2. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1999.

PROFOZICH, D. **Managing change**. [S.I.]: Prentice Hall PRT, 1998.

SERIZAWA, G. H. R.; GALLEGO, J.: **Análise estrutural da aplicação do processo de jateamento com granalhas de aço (shoot peening) em rotores hidroelétricos**. Paper CRE05-PF10, Universidade Estadual Paulista, 2005.

- SHAFER, S. M.; SMUNT, T. L. Empirical simulation studies in operations management: context, trends and research opportunities. **Journal of Operations Management**, v. 22, n. 4, p. 345-354, 2004.
- SIEMENS. **Plant simulation basics, methods and strategies**. Version 9.0.1. [S.I.]: [s.n.], 2009.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- SPRAKEL, E. B.; SEVERIANO FILHO, C. A evolução dos sistemas de PCP sob a ótica da engenharia de produção. In: XIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 1999. ABEPRO, Rio de Janeiro. **Anais....**Rio de Janeiro, 1999.
- STEVENSON, W. J. **Administração das operações de produção**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2001.
- TAVEIRA, R. A. **Uma metodologia para aperfeiçoamento da mudança para um sistema de produção just-in-time em uma indústria metalúrgica, usando simulação discreta e técnicas de projeto de experimentos de Taguchi**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.
- THIOLLENT, M. **Metodologia da pesquisa-ação**. São Paulo: Cortez, 2007.
- TUBINO, D. F. **Manual de planejamento e controle da produção**. São Paulo: Atlas, 1997.
- _____. **Sistemas de Produção: a produtividade no chão de fábrica**. Porto Alegre: Bookman, 1999.
- VAN VOLSEM, S.; DULLAERT, W.; VAN LANDEGHEM, H. An Evolutionary Algorithm and discrete event simulation for optimizing inspection strategies for multi-stage processes. **European Journal of Operational Research**, 179: 621-633, 2007.
- WESTBROOK, R. Action research: a new paradigm for research in production and operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 15, n. 12, p. 6-20, 1995.
- WOLFF, J. F. **Simulação de uma central de atendimento: uma aplicação**. Florianópolis: UFSC, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

Nível -1:



APÊNDICE B – PLANILHA DE RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Data: 15/03/2013 Tempo de simulação: 100 dias (24 horas por dia)

| Modelo | Tanques | | Ocupação estufas e resfriadores e-coat | | WP | | Quantidades processadas | | Tempo de ciclo | | Throughput | | Mix | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|--|----------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------|
| | Tempo de atravessamento nos tanques | Ocupação média dos tanques | Ocupação média estufas e-coat | Tempo médio estufas e-coat | Ocupação média resfriadores e-coat | Tempo médio resfriadores e-coat | WP médio de chassis | WP médio de peças | Quantidade de chassis processados | Quantidade de peças processadas | Tempo de ciclo de chassis | Tempo de ciclo de peças | Taxa de produção de chassis | Taxa de produção de peças | Taxa de produção total | Mix chassis/peças |
| 15.03.13_PEC_Present_status | 0:57:31 | 6,08 | 10,17 | 1:23:18 | 3,81 | 0:31:13 | 32,35 | 10,61 | 11662 | 5877 | 0:12:19,63 | 0:24:28,10 | 4,859 | 2,449 | 7,308 | 1,984 |
| 15.03.13_PEC_Change_1 | 0:57:29 | 6,07 | 9,94 | 1:21:24 | 3,81 | 0:31:13 | 32,23 | 10,54 | 11675 | 5878 | 0:12:18,87 | 0:24:27,74 | 4,865 | 2,449 | 7,314 | 1,986 |
| 15.03.13_PEC_Change_2 | 0:57:30 | 6,08 | 10,34 | 1:24:42 | 3,81 | 0:31:13 | 32,35 | 10,68 | 11671 | 5878 | 0:12:18,97 | 0:24:27,70 | 4,863 | 2,449 | 7,312 | 1,985 |
| 15.03.13_PEC_Change_3 | 0:57:50 | 6,09 | 5,80 | 0:47:44 | 3,62 | 0:29:47 | 30,62 | 9,24 | 11596 | 5880 | 0:12:23,92 | 0:24:27,59 | 4,832 | 2,450 | 7,282 | 1,972 |
| 15.03.13_PEC_Change_4.1 | 0:58:56 | 6,25 | 10,20 | 1:23:29 | 3,81 | 0:31:13 | 32,37 | 10,68 | 11673 | 5879 | 0:12:18,95 | 0:24:27,70 | 4,864 | 2,449 | 7,313 | 1,985 |
| 15.03.13_PEC_Change_4.2 | 0:57:34 | 6,09 | 11,22 | 1:31:49 | 3,81 | 0:31:12 | 32,50 | 10,96 | 11689 | 5879 | 0:12:17,95 | 0:24:27,63 | 4,870 | 2,450 | 7,320 | 1,988 |
| 15.03.13_PEC_Change_4.3 | 0:52:42 | 5,33 | 6,56 | 0:55:22 | 3,74 | 0:31:35 | 30,59 | 9,39 | 11160 | 5881 | 0:12:52,86 | 0:24:27,05 | 4,650 | 2,450 | 7,100 | 1,898 |
| 15.03.13_PEC_Change_5.1 | 0:54:46 | 5,70 | 9,59 | 1:19:11 | 3,80 | 0:31:21 | 32,33 | 10,76 | 11566 | 5850 | 0:12:25,77 | 0:24:34,77 | 4,819 | 2,438 | 7,257 | 1,977 |
| 15.03.13_PEC_Change_5.2 | 0:39:09 | 4,19 | 6,75 | 0:50:30 | 4,30 | 0:32:09 | 31,86 | 8,58 | 13327 | 5882 | 0:10:47,31 | 0:24:26,96 | 5,553 | 2,451 | 8,004 | 2,266 |
| 15.03.13_PEC_Change_6 | 0:55:58 | 6,01 | 6,17 | 0:49:31 | 4,10 | 0:32:53 | 31,11 | 9,41 | 12032 | 5882 | 0:11:56,94 | 0:24:27,02 | 5,013 | 2,451 | 7,464 | 2,045 |

Mudança 1: Linha pintura pó (chassis) mais rápida

Mudança 2: Redução de tempos de processo nos tanques

Mudança 3: Redução de tempos de processo de estufas e resfriadores

Mudança 4: Uma quarta TTB (ponte rolante) no pré-tratamento

4.1: Primeira distribuição de pontes

4.2: Primeira distribuição de pontes mais redução do tempo de processo na estação ST4

4.3: Segunda distribuição de pontes

Mudança 5: Uma segunda estação de trabalho na saída dos tanques (limpeza UF)

5.1: Somente inclusão da segunda estação de trabalho

5.2: Inclusão da segunda estação, mais substituição de uma estufa e-coat por um resfriador

Mudança 6: Duas estufas e-coat substituídas por resfriadores

APÊNDICE C – ARTIGO DISSERTAÇÃO

A UTILIZAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE E MODIFICAÇÃO DE UM SISTEMA DE PRODUÇÃO DE PINTURAS AUTOMOTIVAS

Bernardo Bregoli Soares

Eisenmann do Brasil / Universidade de Caxias do Sul

Resumo:

O presente trabalho descreve a utilização da simulação computacional aplicada ao ambiente da fábrica em uma empresa de pinturas automotivas, visando analisar propostas de modificação futura na fábrica para o atendimento de um novo patamar de demanda de produção. O processo de pintura ocorre em uma linha de produção intermitente, com movimentação por meio de pontes rolantes automáticas. Tal sistema *flow shop* é composto principalmente das operações de jateamento, pintura *e-coat* (eletrodeposição) e *top-coat* (pó). O desafio consiste na análise estruturada do processo produtivo através de métodos científicos, no caso a simulação computacional, e não apenas do conhecimento tácito dos gestores da empresa, visando a rapidez e o embasamento sólido para tomada de decisões perante diferentes cenários de mercado. Buscou-se uma solução considerando o conhecimento de especialistas que atuam no sistema, concomitantemente à análise por meio de simulação produtiva. Foi utilizada a metodologia de pesquisa-ação como estrutura para o projeto de simulação computacional. O software de simulação empregado foi o Tecnomatix Plant Simulation da Empresa Siemens. Dentre os resultados, observou-se uma economia de 64% em relação ao investimento necessário para o aumento de capacidade proposto.

1. Introdução

Haja vista a atual dinâmica do mercado e a constante necessidade das empresas manterem e conquistarem novos clientes torna-se fundamental o movimento de operacionalizar, com a maior eficiência possível, as decisões estruturadas no âmbito estratégico e tático. Para isso, é fundamental que as organizações conheçam profundamente seus processos produtivos, e atuem preventivamente em relação aos cenários futuros que lhe são apresentados.

Uma maior disponibilidade de informações acerca dos processos industriais, promovida pela evolução da tecnologia de informação, proporcionou o estudo desta base de dados por meio

de ferramentas de simulação quantitativa. Sendo que, com a evolução dos computadores e da animação, a simulação difundiu-se como ferramenta de tomada de decisão nas empresas (WOLFF, 2003). Além da utilização como recurso para análise de problemas na produção, a simulação passou a ser utilizada também nas fases de projeto de fábrica. E, com o aumento das opções de programas computacionais, uma melhor animação e ambientes mais amigáveis, a simulação difundiu-se em muitas organizações (CASTILHO, 2004).

Neste contexto, o presente trabalho visa estudar e aplicar a simulação computacional em uma fábrica de pinturas automotivas com o intuito de identificar restrições e gargalos, e apresentar possíveis propostas de modificações, visando, principalmente, o aumento da capacidade produtiva. Em tempo, dar-se-á a análise destas modificações no sistema considerando opções de que possam gerar melhorias no processo e atender um novo patamar de demanda.

Para Bangsow (2010), os propósitos da simulação variam entre os níveis táticos e operacionais. Em um ponto de vista estratégico, usuários podem solucionar problemas relacionados à: condições logísticas, instalação de fábricas em diferentes países, eficiência de mão-de-obra, custos de estocagem, entre outros. Já em um nível operacional, podem-se resolver problemas relacionados à: tamanho de lotes de fabricação, sequência de ordens de produção, recursos necessários, entre outros. Contudo, em ambos os casos, a simulação é utilizada para tomada de decisão sobre sistemas produtivos novos ou já existentes.

Neste contexto, buscam-se respostas para comprovar, antes da aprovação do investimento, que as modificações propostas no sistema de produção estudado irão atender o aumento de demanda proposto. Esta análise auxiliará, ainda, no processo de aprimoramento das ideias relacionadas à quais são as melhores alternativas de modificação do processo produtivo.

O quadro 1 apresenta uma análise em relação à capacidade atual do sistema e as demandas atual e futura, sendo que é verificado um déficit de 18% de capacidade produtiva para atendimento da demanda projetada. Os dados de capacidade são apresentados pela unidade produtiva denominada “barras de carga”, sendo este o pacote de trabalho, ou unidade de produção, que é movimentada ao longo do sistema. A demanda atual é condizente à quantidade média diária de barras de carga necessárias para produção do volume registrado em 2012, sendo que a demanda futura representa a média diária de barras de carga necessárias para o atendimento da demanda prevista para 2015.

Quadro 29 – Análise de capacidade e demanda

| Cenário de Demanda | Demanda (Barras de Carga) | Capacidade (Barras de Carga) | Utilização (%) | Faixa de Capacidade Disponível (%) |
|--------------------|---------------------------|------------------------------|----------------|------------------------------------|
| Atual | 70 | 110 | 64 | +36 |
| Futura | 130 | 110 | 118 | -18 |

O presente trabalho visa a utilização de simulação computacional como ferramenta de apoio às decisões no processo produtivo em questão.

2. Material e métodos

O método de pesquisa utilizado para a realização do trabalho é o da pesquisa-ação, sendo que a atuação do pesquisador abrange o equacionamento do problema, acompanhamento e avaliação das ações propostas para solução do mesmo.

Concebida e realizada associadamente a uma ação com o intuito de solucionar algo, a pesquisa-ação é uma pesquisa com base empírica, em que os pesquisadores são envolvidos de modo participativo ou cooperativo (THIOLENT, 2007).

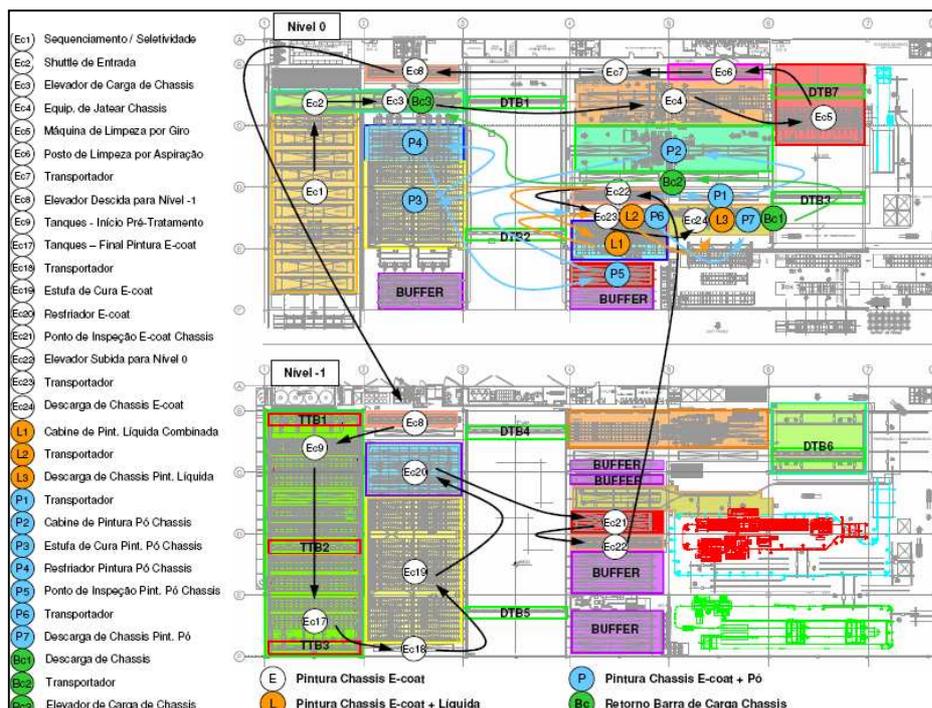
Para o trabalho proposto, foi elaborado um fluxo específico de tarefas considerando a estrutura desse método de pesquisa. Sendo assim, foi confeccionada uma fundamentação teórica, abrangendo conceitos correlatos ao tema estudado; modelou-se o sistema produtivo em software de simulação computacional considerando base de dados obtida através de informações colhidas na empresa, sendo estruturada a configuração atual e as melhorias propostas no sistema. Deu-se a determinação de indicadores para análise e, com base em sucessivas simulações de possibilidades, buscou-se um resultado ideal de modificação do sistema para o atendimento da nova demanda de produção.

3. Resultados e discussão

A empresa estudada possui em sua planta dois níveis (andares) produtivos, sendo o piso inferior (-1) e superior (0). Possui também, em sua estrutura produtiva, dois diferentes fluxos de processo. Podem-se classificar os fluxos de acordo com o tipo de item processado: peças ou chassis. O objeto de estudo deste trabalho está inserido no fluxo de chassis, sendo os mesmos provenientes do cliente e dispostos diretamente na entrada da Endosul. São carregados, jateados

na posição horizontal, e após são girados para a posição vertical. Após descem para o piso inferior para o pré-tratamento, *e-coat*, estufagem e resfriamento. Passam pela plataforma de preparação para o acabamento e retornam para o piso superior para a pintura de acabamento e descarga na linha de montagem do cliente. O fluxo produtivo estudado pode ser verificado na figura 1.

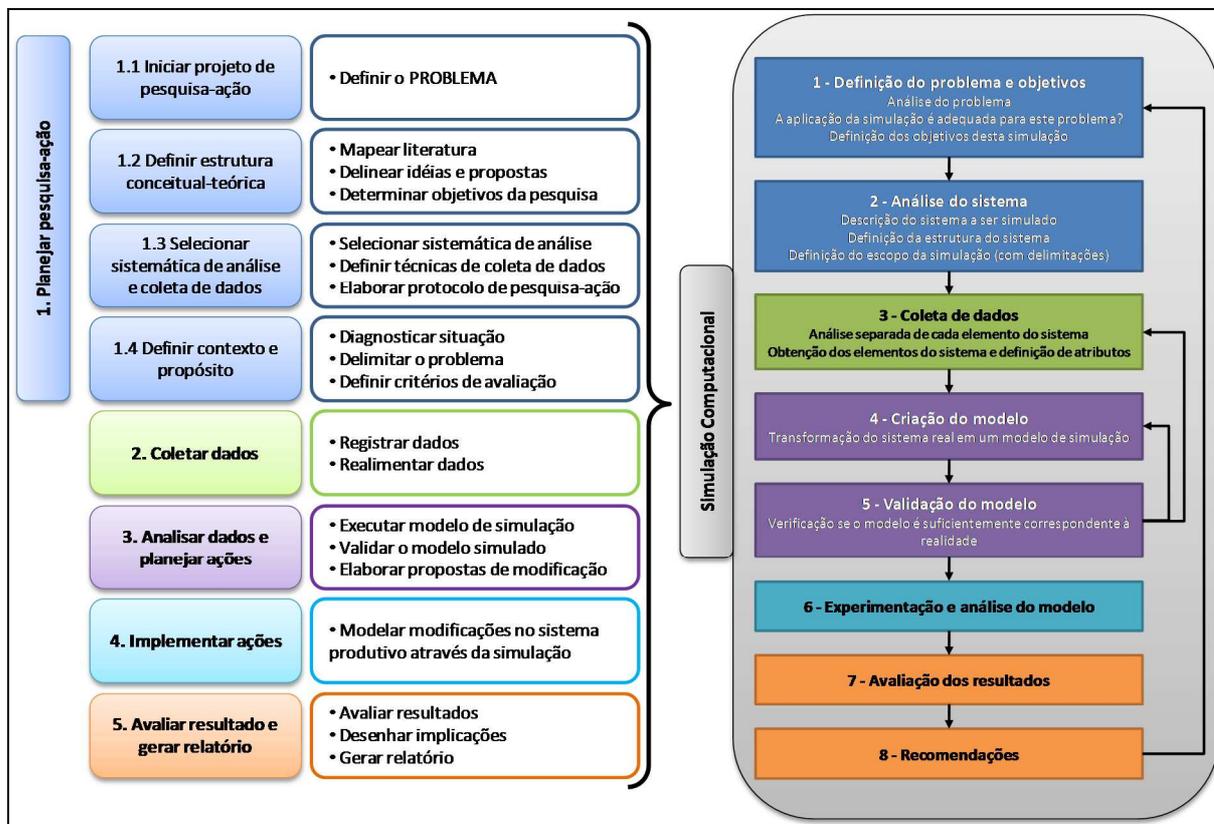
Figura 38 – Layout do fluxo produtivo



Neste contexto, foram analisadas as estruturas da pesquisa-ação propostas por Westbrook (1995), Coughlan e Coughlan (2002), e Thiollent (2007) – figura 2 visando a criação de um modelo específico a ser utilizado no presente trabalho. Além disso, foi inserido um fluxo de condução de etapas da simulação computacional com base na estrutura proposta por Siemens (2009), buscando, por meio desta ferramenta, a implementação e análise virtual das modificações sugeridas no processo de solução do problema.

O modelo de pesquisa-ação conforme autores citados passa por etapas de planejamento, levantamento de dados, análise e implementação de ações e avaliação dos resultados (observadas a esquerda da figura 2). A ferramenta de simulação computacional (foco desse trabalho) é inserida nesta estrutura visando a análise das soluções propostas em um modelo virtual, gerando, com isso, resultados que expressam a realidade futura no caso de execução real no sistema. Assim, as etapas definidas para confecção do trabalho podem ser visualizadas a direita da figura 2 e são sustentadas pelo método da pesquisa-ação.

Figura 39 – Estrutura da pesquisa-ação aliada ao projeto de simulação



Fonte: Adaptado de Westbrook (1995); Coughlan e Coughlan (2002); Thiollent (2007); e Siemens (2009).

O estudo de caso proposto foi escolhido, pois possibilita a análise científica de um projeto de investimento na fábrica, sendo o projeto de maior relevância com relação ao aumento da capacidade produtiva da empresa estudada até 2015. Haja vista a complexidade da análise por meio exclusivo do conhecimento tácito dos gestores da empresa, a simulação computacional apresentou uma possibilidade de análise científica de avaliação das modificações propostas.

Haja vista as etapas propostas no projeto de simulação, foram geradas as saídas do projeto.

- **definição do problema e objetivos**

A definição do problema aplicado à simulação se funde com a própria definição do problema de pesquisa do presente trabalho que é comprovar, antes da aprovação do investimento, que as modificações propostas no sistema de produção estudado irão atender o aumento de demanda proposto.

Os objetivos estão relacionados à análise das modificações propostas e comprovação, ou não, do aumento da capacidade produtiva. Sendo a simulação computacional uma ferramenta que propicia uma análise dinâmica e precisa dos resultados relacionados às mudanças propostas na fábrica objeto deste estudo.

- **análise do sistema**

O sistema simulado é a planta de pintura estudada. O escopo da simulação é delimitado pelo processo completo de pintura dos chassis, desde sua carga até sua descarga. Não são consideradas variáveis relacionadas ao abastecimento e retirada dos produtos por parte da Randon.

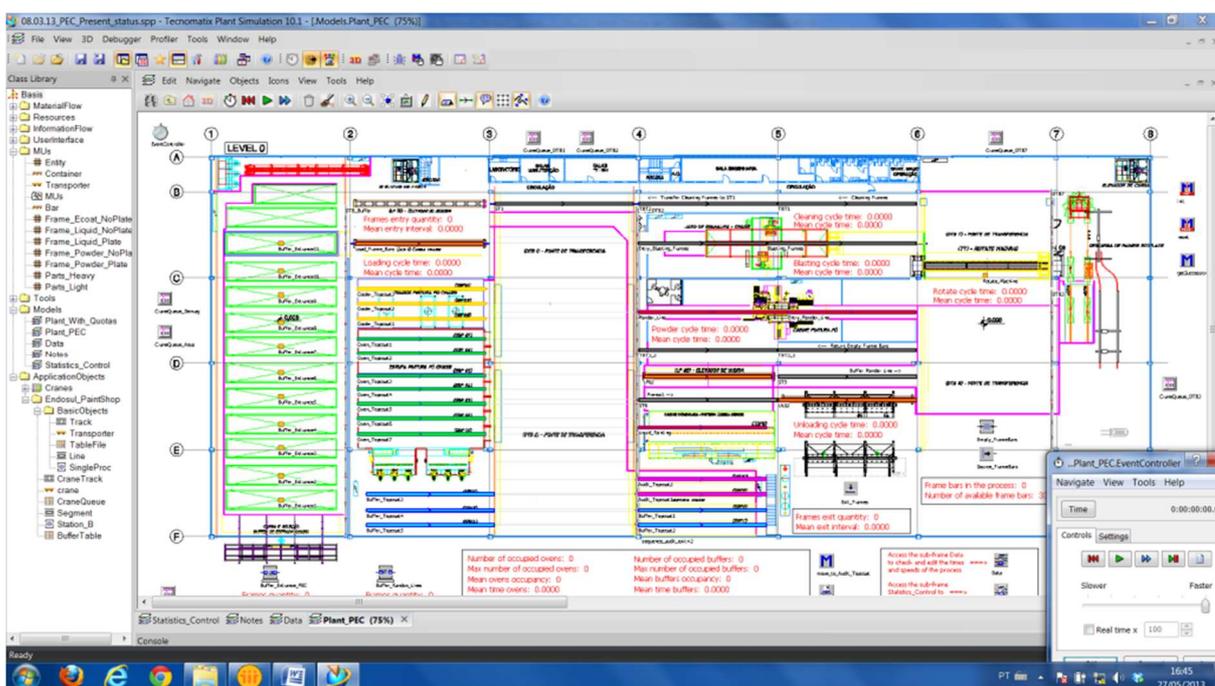
- **coleta de dados**

Os dados de entrada são agrupados em: tipos de produtos, fluxos de processo, mix de produtos, tempos de processo, e transportadores.

- **criação do modelo**

Foi simulada a planta no software Tecnomatix Plant Simulation da Siemens, sendo que o mesmo pode ser visualizado na figura 3.

Figura 40 – Modelo de simulação



- **validação do modelo**

Para comprovação de que o modelo de simulação representa de maneira fidedigna o comportamento real do sistema produtivo analisado foram estabelecidos indicadores que foram analisados pelo grupo envolvido no estudo. Foram avaliados: tempos de estações de trabalho; ocupação de estufas, resfriadores e buffers; indicadores da área dos tanques; e indicadores gerais de processo.

Os resultados obtidos no modelo indicam uma boa representatividade do processo atual da Endosul-PEC. Os tempos de ciclo encontrados, de 12:19 min para chassis e 24:28 min para peças, estão em acordo com os tempos utilizados na programação da produção da fábrica, que são de 12:00 min para chassis e 24:00 min para peças.

- **experimentação e análise do modelo**

Nesta fase do estudo são apresentadas as conclusões obtidas a partir das mudanças propostas em relação ao modelo do estado atual da Endosul-PEC. As mudanças são inicialmente analisadas isoladamente, e depois combinadas em alguns agrupamentos. Os resultados são apresentados no quadro 2.

Quadro 30 – Resultados de tempo de ciclo de chassis

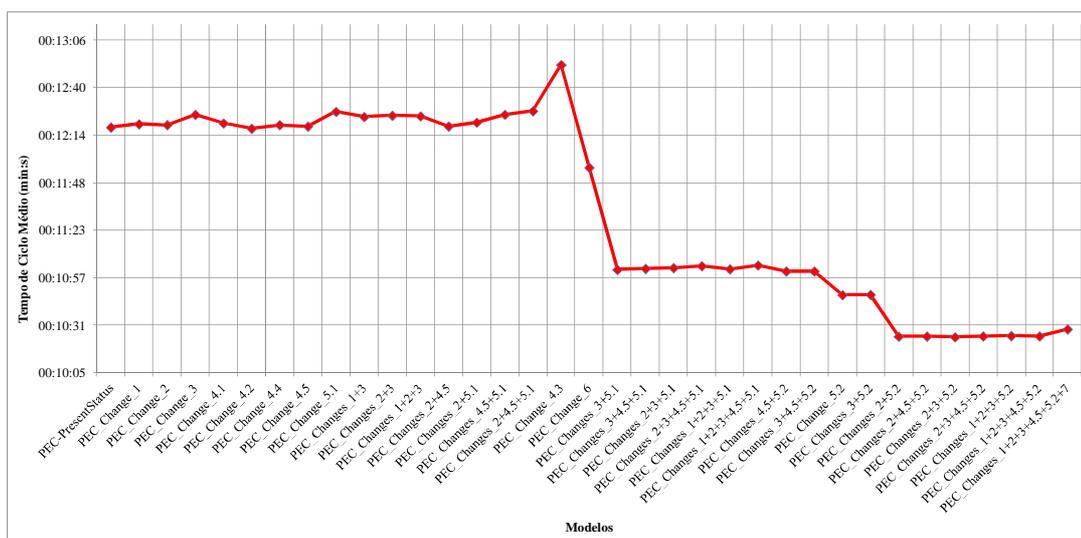
| Modelo | Tempo de ciclo de chassis | Modelo | Tempo de ciclo de chassis |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| PEC_Present_status | 0:12:18.78 | PEC_Changes_3+5.1 | 0:11:00.98 |
| PEC_Change_1 | 0:12:20.51 | PEC_Changes_3+4.5+5.1 | 0:11:01.52 |
| PEC_Change_2 | 0:12:20.06 | PEC_Changes_2+3+5.1 | 0:11:01.91 |
| PEC_Change_3 | 0:12:25.60 | PEC_Changes_2+3+4.5+5.1 | 0:11:02.97 |
| PEC_Change_4.1 | 0:12:21.00 | PEC_Changes_1+2+3+5.1 | 0:11:01.28 |
| PEC_Change_4.2 | 0:12:18.06 | PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.1 | 0:11:03.35 |
| PEC_Change_4.4 | 0:12:20.03 | | |
| PEC_Change_4.5 | 0:12:19.27 | PEC_Changes_4.5+5.2 | 0:11:00.11 |
| PEC_Change_5.1 | 0:12:27.28 | PEC_Changes_3+4.5+5.2 | 0:11:00.14 |
| PEC_Changes_1+3 | 0:12:24.44 | | |
| PEC_Changes_2+3 | 0:12:25.19 | PEC_Change_5.2 | 0:10:47.17 |
| PEC_Changes_1+2+3 | 0:12:24.78 | PEC_Changes_3+5.2 | 0:10:47.29 |
| PEC_Changes_2+4.5 | 0:12:19.29 | | |
| PEC_Changes_2+5.1 | 0:12:21.41 | PEC_Changes_2+5.2 | 0:10:24.52 |
| PEC_Changes_4.5+5.1 | 0:12:25.68 | PEC_Changes_2+4.5+5.2 | 0:10:24.57 |
| PEC_Changes_2+4.5+5.1 | 0:12:27.64 | PEC_Changes_2+3+5.2 | 0:10:24.14 |
| | | PEC_Changes_2+3+4.5+5.2 | 0:10:24.60 |
| PEC_Change_4.3 | 0:12:52.89 | PEC_Changes_1+2+3+5.2 | 0:10:24.81 |
| | | PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.2 | 0:10:24.59 |
| PEC_Change_6 | 0:11:56.82 | PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.2+7 | 0:10:28.45 |

Fazendo-se uma análise global dos resultados do quadro 2, verifica-se que há quatro faixas de valores de tempo de ciclo, menores que o valor do estado atual:

- 11:56 min: tempo obtido com a mudança 6, ou seja, a substituição de duas estufas *e-coat* por resfriadores;
- 11:00 min: embora este resultado tenha sido obtido em diversas combinações, verifica-se que apenas as mudanças 3 (redução dos tempos de processo de estufas e resfriadores) e 5.1 (inserção de uma segunda estação de trabalho na limpeza UF) são suficientes (modelo “PEC_Changes_3+5.1”). Há ainda dois modelos com a mudança 5.2 e resultados nesta faixa de tempo, mas que são decorrentes de uma piora de resultados em função da combinação com a mudança 4.5;
- 10:47 min: tempo de ciclo obtido com a mudança 5.2 (inclusão da segunda estação de trabalho combinada com a substituição de uma estufa *e-coat* por um resfriador);
- 10:24 min: ainda que este resultado tenha sido observado em diversas combinações, verifica-se que as mudanças 2 (redução de tempos de processo nos tanques do pré-tratamento) e 5.2 são as determinantes (modelo “PEC_Changes_2+5.2”).

O gráfico apresentado na figura 4 apresenta a evolução dos resultados de tempo de ciclo considerando as modificações propostas. Nele podem ser observadas as quatro faixas de valores de tempos de ciclo médio citadas (aproximadamente 11:56 min; 11:00 min; 10:47 min; e 10:24 min).

Figura 41 – Gráfico dos Modelos Simulados em relação ao Tempo de Ciclo Médio



Com base nos resultados obtidos a partir dos modelos, e das correlações estabelecidas, pode-se definir três patamares de redução do tempo de ciclo de chassis, a partir de mudanças no processo. O quadro 3 lista as mudanças determinantes, a redução do tempo de ciclo de chassis e o aumento do *throughput* de chassis resultantes da(s) mesma(s).

Esses resultados apresentam opções para a tomada de decisão com relação à melhor solução de modificações para aumento de capacidade. Percebe-se, em tempo, que combinações intermediárias, ou seja, com menor número de pontos modificados combinados, já leva a patamares semelhantes de aumento de capacidade, fato que oportuniza a redução do investimento empregado.

Quadro 31 – Mudanças determinantes para redução do tempo de ciclo

| Mudanças | Redução do tempo de ciclo de chassis | Aumento do throughput de chassis |
|--|---|---|
| redução dos tempos de processo de estufas e resfriadores, e inserção de uma segunda estação de trabalho na limpeza UF | 78 s | 12% |
| inclusão de uma segunda estação de trabalho na limpeza UF, combinada com a substituição de uma estufa e-coat por um resfriador | 91 s | 14% |
| inclusão de uma segunda estação de trabalho na limpeza UF, combinada com a substituição de uma estufa e-coat por um resfriador e a redução de tempos de processo nos tanques do pré-tratamento | 114 s | 18% |

- **resultados finais e recomendações**

Relembrando o quadro 1 deste trabalho que apresenta o déficit de 18% de capacidade em relação à demanda futura de 130 barras de carga por dia, a pesquisa-ação aplicando a simulação de produção neste sistema produtivo apresentou a comprovação, assim como a combinação ideal de modificações, para que este novo patamar de produção seja alcançado.

Comprovou-se, com o último quadro deste trabalho (quadro 25) uma opção ideal que promove o aumento dos mesmos 18% demandados no início do trabalho.

Complementarmente, foi feita uma estimativa de investimento para cada uma das mudanças propostas, sendo apresentadas no quadro 4. A intenção foi avaliar financeiramente a importância de cada uma das propostas de modificação, atuando como orientação complementar para a tomada de decisão.

Quadro 32 – Valores de investimento para os modelos simulados

| Modelo | Tempo de ciclo de chassis | Custo TOTAL (em Mi de R\$) | Modelo | Tempo de ciclo de chassis | Custo TOTAL (em Mi de R\$) |
|-----------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| PEC_Present_status | 0:12:18.78 | 0 | PEC_Changes_3+5.1 | 0:11:00.98 | 0,6 |
| PEC_Change_1 | 0:12:20.51 | 1 | PEC_Changes_3+4.5+5.1 | 0:11:01.52 | 2,1 |
| PEC_Change_2 | 0:12:20.06 | 1 | PEC_Changes_2+3+5.1 | 0:11:01.91 | 1,6 |
| PEC_Change_3 | 0:12:25.60 | 0,1 | PEC_Changes_2+3+4.5+5.1 | 0:11:02.97 | 3,1 |
| PEC_Change_4.1 | 0:12:21.00 | 1,5 | PEC_Changes_1+2+3+5.1 | 0:11:01.28 | 2,6 |
| PEC_Change_4.2 | 0:12:18.06 | 1,5 | PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.1 | 0:11:03.35 | 4,1 |
| PEC_Change_4.4 | 0:12:20.03 | 1,5 | | | |
| PEC_Change_4.5 | 0:12:19.27 | 1,5 | PEC_Changes_4.5+5.2 | 0:11:00.11 | 2,5 |
| PEC_Change_5.1 | 0:12:27.28 | 0,5 | PEC_Changes_3+4.5+5.2 | 0:11:00.14 | 2,6 |
| PEC_Changes_1+3 | 0:12:24.44 | 1,1 | | | |
| PEC_Changes_2+3 | 0:12:25.19 | 1,1 | PEC_Change_5.2 | 0:10:47.17 | 1 |
| PEC_Changes_1+2+3 | 0:12:24.78 | 2,1 | PEC_Changes_3+5.2 | 0:10:47.29 | 1,1 |
| PEC_Changes_2+4.5 | 0:12:19.29 | 2,5 | | | |
| PEC_Changes_2+5.1 | 0:12:21.41 | 1,5 | PEC_Changes_2+5.2 | 0:10:24.52 | 2 |
| PEC_Changes_4.5+5.1 | 0:12:25.68 | 2 | PEC_Changes_2+4.5+5.2 | 0:10:24.57 | 3,5 |
| PEC_Changes_2+4.5+5.1 | 0:12:27.64 | 3 | PEC_Changes_2+3+5.2 | 0:10:24.14 | 2,1 |
| | | | PEC_Changes_2+3+4.5+5.2 | 0:10:24.60 | 3,6 |
| PEC_Change_4.3 | 0:12:52.89 | 1,5 | PEC_Changes_1+2+3+5.2 | 0:10:24.81 | 3,1 |
| | | | PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.2 | 0:10:24.59 | 4,6 |
| PEC_Change_6 | 0:11:56.82 | 1 | PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.2+7 | 0:10:28.45 | 5,6 |

Com base nos resultados das melhores combinações aliados aos valores de investimento é apresentado o quadro 5.

A condição proposta pela empresa, antes da análise de simulação e com base apenas no conhecimento dos especialistas no sistema produtivo em questão, era para que fossem executados todos os investimentos propostos. Sendo esta uma condição importante para que se atingisse a nova condição de capacidade que atenderia a demanda futura proposta.

Contudo, estas modificações eram baseadas em conhecimentos heurísticos dos especialistas da fábrica, sem confirmação científica.

Quadro 33 – Melhores investimentos

| Mudança | Descrição | Redução do tempo de ciclo de chassis | Aumento do throughout de chassis | Investimento (Mi de R\$) |
|-------------------|--|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| PEC_Changes_3+5.1 | redução dos tempos de processo de estufas e resfriadores, e inserção de uma segunda estação de trabalho na limpeza UF | 78 s | 12% | 0,6 |
| PEC_Changes_5.2 | inclusão de uma segunda estação de trabalho na limpeza UF, combinada com a substituição de uma estufa e-coat por um resfriador | 91 s | 14% | 1 |
| PEC_Changes_2+5.2 | inclusão de uma segunda estação de trabalho na limpeza UF, combinada com a substituição de uma estufa e-coat por um resfriador e a redução de tempos de processo nos tanques do pré-tratamento | 114 s | 18% | 2 |

Sendo assim, o trabalho apresentou um resultado importante, haja vista que não apenas comprovou cientificamente a obtenção da capacidade proposta, como mostrou que a mesma pode ser obtida com um valor menor de investimento conforme mostrado no quadro 6.

Quadro 34 – Comparação entre as mudanças propostas antes e depois da simulação

| Proposta | Mudanças | Investimento Total (Mi de R\$) | Aumento de Capacidade |
|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Antes da simulação | PEC_Changes_1+2+3+4.5+5.2+7 | 5,6 | 18% |
| Depois da simulação | PEC_Changes_2+5.2 | 2 | 18% |
| Ganho em economia de investimento → | | 3,6 | |

Concluindo, foi encontrada por meio da simulação uma proposta que proporciona os 18% necessários de aumento de capacidade, contudo utilizando apenas 36% do investimento proposto inicialmente, ou seja, gerando uma economia de 64% de recursos, ou 3,6 milhões de reais.

4. Conclusão

O presente trabalho estudou, estruturou e aplicou uma metodologia relacionada à utilização da simulação computacional na tomada de decisão no planejamento de modificações de um sistema produtivo de pinturas automotivas.

Esta aplicação mostrou-se de grande valia para análise de resultados e orientação para tomada de decisão acerca de modificações na fábrica. Modificações essas que podem ser analisadas separadamente e de forma combinada, ainda na fase de planejamento, fato que ratifica e dá segurança na tomada de decisão com relação às estratégias de produção.

O modelo de simulação foi estruturado representando o processo produtivo estudado; foi aplicada a simulação computacional por meio do software Tecnomatix Plant Simulation; as modificações foram testadas; e os resultados foram utilizados como norteadores para o processo decisório.

Com relação ao questionamento que baliza o problema de pesquisa: como a simulação computacional pode ser utilizada como ferramenta para auxiliar na tomada de decisão no planejamento de uma modificação em um processo produtivo de pinturas automotivas? Este trabalho apresenta resultados positivos, pois aplica uma metodologia estruturada para a utilização da simulação computacional, e os resultados gerados pelo trabalho apontam ganhos importantes, sendo que, considerando a economia de 64% nos recursos a serem empregados para que seja obtido o aumento de capacidade proposto, a aplicação da simulação computacional apresentou sucesso.

Neste contexto, haja vista as conclusões acima relatadas, o trabalho obteve êxito em sua proposta. Sendo que, como sequencia, poderá ser estruturada uma atualização da metodologia de trabalho utilizada para o emprego da simulação computacional na análise de melhorias de projetos de fábrica. Artigos científicos foram gerados deste trabalho, sendo relacionados à utilização da simulação computacional, e a análise de incertezas na medição de tempos nos postos de trabalho; sendo que outros estudos periféricos ou derivados deste trabalho ainda podem ser desenvolvidos, tais como: a utilização da simulação no planejamento de produção, e a utilização da simulação nos postos de trabalho com operações manuais.

Referências

BANGSOW, S. **Manufacturing simulation with plant simulation and Simtalk**. Berlin: Springer, 2010.

CARR, W. Philosophy, methodology and action research. **Journal of Philosophy of Education**. v. 40, n. 4, p. 421-435, 2006.

CASSEL, R. A. **Desenvolvimento de uma abordagem para a divulgação da simulação no setor calçadista gaúcho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

CASTILHO, M. R. **O uso da simulação computacional como ferramenta de auxílio à tomada de decisão: aplicação em uma empresa de papelão ondulado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

CHUNG, C. A. **Simulation modeling handbook** – a practical approach. Florida: CRC Press LLC, 2004.

COUGHLAN, P.; COGHLAN, D. Action research for operations management. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 220-240, 2002.

KOUSKOURAS, K. G.; GEORGIU, A. C. A discrete event simulation model in the case of managing a software project. **European Journal of Operational Research**, 181: 374-389, 2007.

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

SIEMENS. **Plant simulation basics, methods and strategies**. Version 9.0.1. [S.I.]: [s.n.], 2009.

TAVEIRA, R. A. **Uma metodologia para aperfeiçoamento da mudança para um sistema de produção just-in-time em uma indústria metalúrgica, usando simulação discreta e técnicas de projeto de experimentos de Taguchi.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

THIOLLENT, M. **Metodologia da pesquisa-ação**. São Paulo: Cortez, 1998.

TUBINO, D. F. **Manual de planejamento e controle da produção**. São Paulo: Atlas, 1997.

_____. **Sistemas de Produção: a produtividade no chão de fábrica**. Porto Alegre: Bookman, 1999.

VAN VOLSEM S.; DULLAERT, W.; VAN LANDEGHEM, H. An Evolutionary Algorithm and discrete event simulation for optimizing inspection strategies for multi-stage processes. **European Journal of Operational Research**, 179: 621-633, 2007.

WOLFF, J. F. **Simulação de uma central de atendimento: uma aplicação**. Florianópolis: UFSC, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

APÊNDICE D – ARTIGO INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

INCERTEZAS NA MEDIÇÃO DE TEMPOS DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

Bernardo Bregoli Soares

Eisenmann do Brasil / Universidade de Caxias do Sul

Resumo:

A utilização da incerteza como um atributo quantificável é relativamente nova na história da medição, embora o *erro* e a *análise de erro* tenham sido parte da ciência da medição há mais tempo. Mesmo com os *erros* conhecidos e as devidas correções aplicadas, permanece uma incerteza sobre o quão correto é o resultado declarado, ou seja, uma dúvida do quão corretamente o resultado da medição representa o valor da grandeza que está sendo medida. Posto isso, em um contexto industrial, este trabalho aplica uma metodologia para verificação das incertezas na medição de tempos em estações de trabalho de uma planta de pinturas industriais.

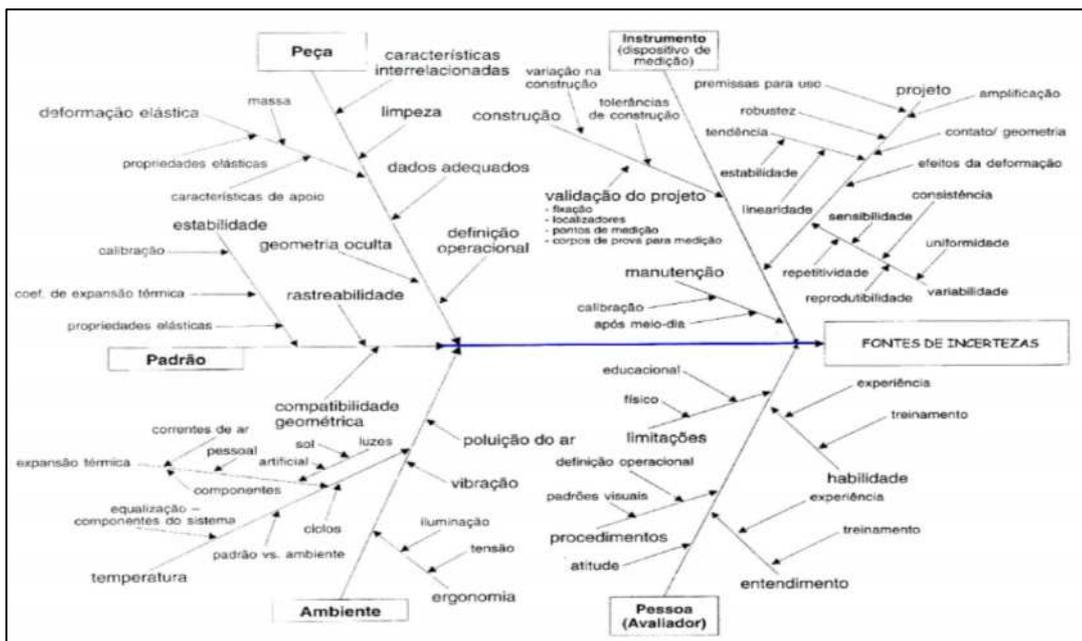
1. Introdução

A medição de uma grandeza física está relacionada a compará-la com outra grandeza do mesmo tipo, escolhida como padrão ou termo de comparação. Por definição, a medição consiste no relacionamento entre duas grandezas físicas, tratando-se de uma comparação. É um ato projetado para “obter informação quantitativa a respeito de” algum fenômeno físico por meio da comparação com um padrão ou referência (BIPM, 1993).

Com a medição de uma grandeza física por meio de algum instrumento que indica um determinado valor numérico surge à necessidade de se conhecer o quão verdadeiro é esse valor numérico, ou seja, o quão próximo ele está da medida verdadeira. Esse referido valor verdadeiro é desconhecido ou impossível de ser obtido na prática. No entanto, pode-se definir esse valor verdadeiro como um valor que seria obtido por meio de um experimento ideal.

Ao se relatar o resultado de medição de uma grandeza física deve-se expressar alguma indicação quantitativa relacionada à qualidade do resultado, visando o entendimento de sua confiabilidade. Nesse contexto, faz-se necessário que exista um procedimento que seja de pronta aplicação, fácil compreensão e ampla aceitação, buscando caracterizar a qualidade de um resultado de uma medição, ou seja, expressar sua incerteza. A figura 1 mostra uma gama de possíveis incertezas.

Figura 42 – Exemplos de fontes de incerteza



Fonte: Adaptado de AIAG, ASQ (2002)

Da mesma forma que outros tipos de processos, um processo de medição pode sofrer variações, sendo que as fontes de erro de medição podem ser classificadas em cinco categorias (AIAG, ASQ, 2002): padrão, peça, instrumento, pessoa (avaliador) e ambiente (esse modelo é conhecido pela sigla SWIPE, acrônimo dos termos em inglês *Standard, Workpiece, Instrument, Procedure, Environment*). Com esse conjunto de fatores, os resultados de uma medição afastam-se do valor verdadeiro da grandeza medida (ou valor do mensurando).

Neste trabalho é proposta uma avaliação de incertezas de medição de tempo em estações de trabalho de uma planta industrial. Essa planta consiste em uma fábrica que promove o tratamento superficial por meio de processos de: jateamento, pré-tratamento (com fosfatização), *e-coat* (pintura por eletrodeposição catódica), e *top-coat* (pintura de acabamento com tinta pó poliéster ou tinta líquida poliuretânica). Os postos de trabalho sob avaliação demandam intervenção manual (por meio de pessoas) e requerem medições do tempo de algumas operações para controle interno.

Para tanto, é empregada a metodologia proposta no documento *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM:2008) para a avaliação das incertezas na medição de tempos de processos industriais. Sendo importante para consideração das possíveis variações de capacidade produtiva da planta em relação às incertezas de medição nos postos de trabalho.

2. Material e métodos

O levantamento de tempos de processo foi feito utilizando-se cronômetros e planilhas para registro dos dados. Os cronômetros utilizados são da marca CSR, modelo CR6QG. Modelos de planilhas foram disponibilizados aos operadores, para padronizar a inserção das informações. Os operadores também receberam orientações específicas para cada posto de trabalho, passadas aos mesmos por meio de um treinamento e de material impresso.

O cálculo de incerteza das medições foi baseado no documento Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição (JCGM 100:2008), o qual é uma tradução do documento *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM:2008). O documento original foi elaborado por um grupo de trabalho conjunto formado por especialistas nomeados pelo Birô Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), pela Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), pela Organização Internacional para a Normalização (ISO), e pela Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML). A tradução foi realizada pelo Grupo de Trabalho 1 do Comitê Conjunto para Guias em Metrologia (JCGM/WG 1).

A seguir é realizada uma breve descrição dos elementos e equações utilizados no cálculo de incerteza.

- *Incerteza de medição*

Parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. A incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando.

- *Distribuição de probabilidade (de uma variável aleatória)*

Função que determina a probabilidade de uma variável aleatória assumir qualquer valor dado ou pertencer a um dado conjunto de valores.

- *Divisor*

Termo utilizado no cálculo da incerteza padrão. O valor do divisor depende da fonte de incerteza e da distribuição de probabilidade.

- *Incerteza padrão (u_{xi})*

Incerteza do resultado de uma medição expressa como um desvio padrão. O valor é obtido a partir da equação (1).

$$u_{xi} = \frac{\text{valor de entrada}}{\text{divisor}} \quad (1)$$

- *Coefficiente de sensibilidade (c_i)*

Quando as unidades das fontes de incerteza não são iguais, faz-se necessário determinar o grau de influência de cada unidade no resultado final, ou seja, deve-se determinar o coeficiente de sensibilidade de cada unidade envolvida. Esta conversão se dá através de derivadas parciais da equação de medição para cada variável.

Quando a fonte de incerteza tem a mesma unidade do resultado final, o coeficiente de sensibilidade é igual a 1.

- *Contribuição para a incerteza u_i*

A contribuição individual de cada fonte de incerteza u_i é encontrada multiplicando-se o valor da incerteza padrão (u_{xi}) pelo respectivo coeficiente de sensibilidade (c_i), conforme equação (2).

$$u_i = u_{xi} \cdot c_i \quad (2)$$

- *Incerteza padrão combinada (u_c)*

Incerteza padrão do resultado de uma medição, quando esse resultado é obtido por meio dos valores de várias outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, que constituem as variâncias ou covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com o quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas, equação (3).

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2} \quad (3)$$

- *Fator de abrangência (k)*

Fator numérico utilizado como um multiplicador da incerteza padrão combinada de modo a obter uma incerteza expandida.

- *Incerteza expandida (U)*

Quantidade que define um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. O valor da incerteza expandida é obtido a partir da equação (4).

$$U = u_c \cdot k \quad (4)$$

- *Grau de liberdade (v_i)*

Em geral, corresponde ao número de termos em uma soma menos o número de restrições sobre os termos da soma.

- *Grau de liberdade efetivo (v_{eff})*

Representa o grau de liberdade do conjunto de fontes de incertezas envolvidas. É determinado a partir dos graus de liberdade de cada fonte e da equação (5).

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (5)$$

Esse valor é utilizado para determinar o fator de abrangência *k*, utilizando uma tabela de distribuição *t* de *Student*. O quadro 1 apresenta de forma simplificada a relação entre os principais tipos de fontes de incerteza e suas características estatísticas.

Quadro 35 – Relação de fontes de incerteza e características estatísticas

| Fontes de incerteza | Distribuição | Divisor | Graus de liberdade |
|--|--------------|---------|----------------------------|
| - Erros sistemáticos, padrão - Efeito da resolução do equipamento | Retangular | | infinitos |
| - Erros de posicionamento (distribuição não equiprovável) | Triangular | | infinitos |
| - Erros oriundos de variações - temperatura | Oscilante | | infinitos |
| - Incertezas herdadas (certificados) | t-student | k | v _{eff} |
| - Desvio padrão experimental da média | | | n-1 |
| - Desvio padrão R&R | | 1 | n-1 |
| - Desvio padrão carta controle | | | |
| - Desvio padrão de resíduos de curvas de correção | | 1 | (n-1) - graus do polinômio |

Fonte: Adaptado de AIAG, ASQ (2002)

Como pode ser observado no quadro 1, cada tipo de fonte incerteza é associado a uma distribuição de probabilidades característica. O valor do divisor, referente a cada tipo de distribuição, é utilizado para converter os valores de incerteza aos valores de uma mesma distribuição base, neste caso a distribuição normal.

Os valores de graus de liberdade são associados às características de cada distribuição. A discussão destas características foge ao escopo deste trabalho, e maiores detalhes podem encontrados em Montgomery (2001).

- *Desvio padrão amostral*

Apresenta a relação entre o desvio padrão e o número de amostras, conforme observado na equação (6).

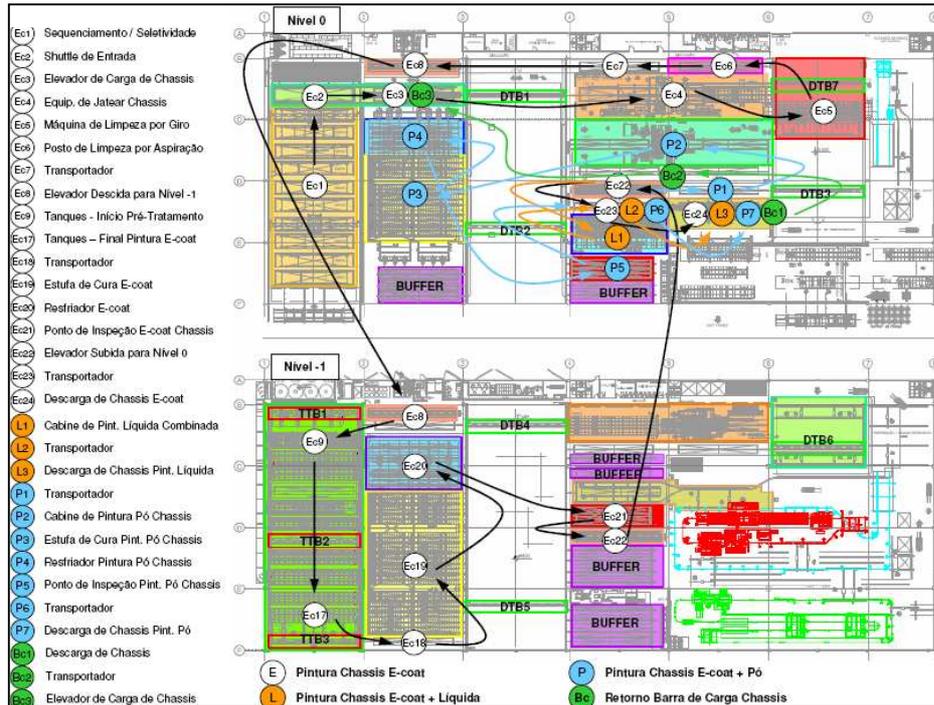
$$\text{Desvio padrão amostral} = \frac{\text{Desvio padrão}}{\sqrt{n^\circ \text{ amostras}}} \quad (6)$$

3. Resultados e discussão

A empresa possui em sua planta dois níveis (andares) produtivos, sendo o piso inferior (-1) e superior (0). Possui também em sua estrutura produtiva dois diferentes fluxos de processo. Podem-se classificar os fluxos de acordo com o tipo de item processado: peças ou chassis. O objeto de estudo deste trabalho está inserido no fluxo de chassis, sendo os mesmos provenientes das do cliente e dispostos diretamente na entrada da Endosul. São carregados, jateados na posição horizontal, e após são girados para a posição vertical. Após descem para o piso inferior para o pré-tratamento, *e-coat*, estufagem e resfriamento. Passam pela plataforma de preparação para o acabamento e retornam para o piso superior para a pintura de acabamento e descarga na linha de montagem do cliente.

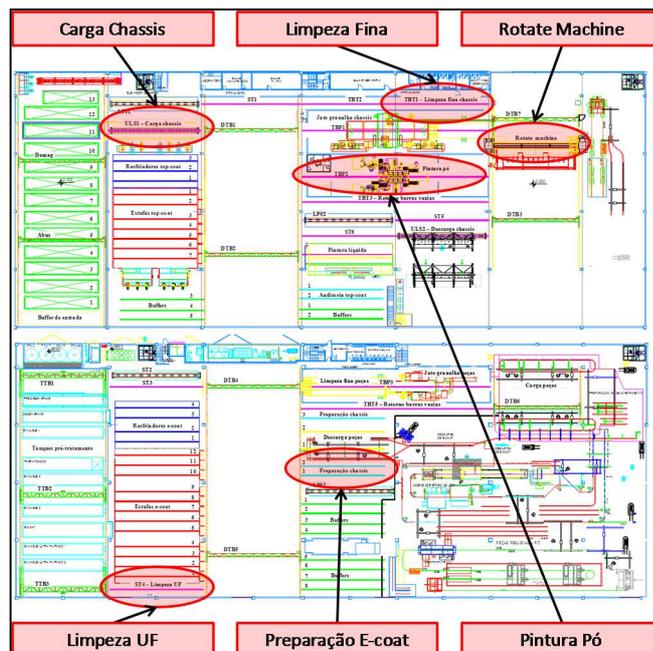
Considerando o fluxo produtivo apresentado na figura 2, foram elencadas algumas estações de trabalho com atividade manual de operadores para medição dos tempos.

Figura 43 – Layout do fluxo produtivo



Haja visto o processo produtivo, a figura 3 destaca as estações de trabalho analisadas no presente trabalho.

Figura 44 – Estações de trabalho analisadas



No posto de trabalho de carga de chassis, dá-se o içamento dos chassis em uma barra de carga por meio de correntes. Na estação *rotate machine*, os chassis são girados para o escoamento da granalha de aço proveniente do jateamento e reposicionados em uma barra de carga. Na limpeza fina, ocorre a retirada manual do pó de granalha. Já na limpeza UF é retirado o excesso de líquidos acumulados em banhos de pré-tratamento e *e-coat*. Por fim, no posto de pintura pó, acontece a pintura da camada *top-coat* nos chassis.

Nas estações de trabalho elencadas, foram definidas as seguintes fontes de incerteza:

- a) Resolução do cronômetro;
- b) Diferentes medidores (pessoas);
- c) Desvio padrão das medições.

No quadro 2 é apresentado um exemplo de cálculo do valor de entrada da incerteza relativa a diferentes pessoas (no posto de trabalho de carga de chassis).

Quadro 36 – Exemplo de cálculo do valor de entrada da incerteza relativa a diferentes pessoas

| Responsável | Média (s) | Desvio padrão (s) | N° amostras | Desvio padrão amostral (s) | Desvio amostral médio (s) |
|--------------------|------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Irani | 230,9 | 41,5 | 31 | 7,5 | 7,0 |
| Ivo | 249,1 | 67,3 | 231 | 4,4 | |
| Marcelo | 291,2 | 91,9 | 128 | 8,1 | |
| Omar | 298,7 | 73,2 | 82 | 8,1 | |

O desvio amostral médio corresponde à média dos desvios padrões amostrais de cada pessoa. Este número é utilizado como valor de entrada para o cálculo da incerteza relativa aos diferentes medidores. No quadro 3 são listados os valores obtidos para os diferentes postos de trabalho.

Quadro 3 – Desvio amostral médio dos postos de trabalho

| Posto de trabalho | Desvio amostral médio (s) | Número de medidores | Nº de amostras |
|--------------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| Carga de chassis | 7,0 | 4 | 472 |
| Rotate machine | 13,0 | 4 | 316 |
| Limpeza fina | 13,9 | 3 | 321 |
| Limpeza UF | 13,4 | 2 | 167 |
| Preparação e-coat | 24,6 | 2 | 145 |
| Pintura pó | 14,9 | 2 | 137 |

O menor desvio foi obtido na condição com maiores números de medidores e de amostras (Carga de chassi). Já o maior desvio foi registrado para o posto Preparação e-coat, que é um dos postos onde foi empregado o menor número de medidores e possui o segundo menor número de amostras. Mas não é possível estabelecer uma relação direta entre esses valores, pois, comparando os resultados dos postos Rotate machine e Limpeza UF, embora ambos tenham apresentado valores de desvio semelhantes, o primeiro teve o dobro de medidores e número de amostras em relação ao segundo.

Os resultados de média e desvio padrão dos tempos registrados nos diferentes postos de trabalho são apresentados no quadro 4.

Quadro 4 – Resultados de média e desvio padrão nos postos de trabalho

| Posto de trabalho | Média (s) | Desvio padrão (s) | Relação desvio padrão/média | Nº de amostras |
|--------------------------|------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Carga de chassis | 268,0 | 78,1 | 0,29 | 472 |
| Rotate machine | 589,7 | 111,0 | 0,19 | 316 |
| Limpeza fina | 534,6 | 171,7 | 0,32 | 321 |
| Limpeza UF | 456,2 | 172,0 | 0,38 | 167 |
| Preparação e-coat | 884,3 | 218,8 | 0,25 | 145 |
| Pintura pó | 711,9 | 159,4 | 0,22 | 137 |

Como pode ser observado, o desvio padrão dos tempos registrados é elevado, representando entre 19 e 38% dos valores médios obtidos nos postos de trabalho. Embora haja diferenças significativas entre os números de amostras, não é observada uma correlação direta com os desvios padrões obtidos. O posto de trabalho com menor número de amostras (Pintura

pó), por exemplo, apresentou a segunda menor relação desvio padrão/média. Já o posto com maior número de amostras (Carga de chassis), apresentou o terceiro maior valor para a mesma relação.

O quadro 5 apresenta um exemplo de tabulação para o cálculo da incerteza (Carga de chassis).

Quadro 5 – Exemplo do cálculo de incerteza

| Fonte de incerteza | unidade | valor de entrada | distribuição de probabilidade | divisor | incerteza padrão | coeficiente de sensibilidade | contribuição para a incerteza | vi |
|--------------------------------|---------|------------------|------------------------------------|---------|------------------|------------------------------|-------------------------------|----------|
| resolução do cronômetro | s | 0,1 | retangular | raiz(3) | 0,06 | 1 | 0,06 | ∞ |
| diferentes medidores (pessoas) | s | 7,0 | t-student | raiz(n) | 3,51 | 1 | 3,51 | 3 |
| desvio padrão das medições | s | 78,0 | t-student | raiz(n) | 3,59 | 1 | 3,59 | 471 |
| Carga de chassis | | | incerteza padrão combinada $u_c =$ | | | 5,02 | $\nu_{\text{eff}} =$ | 12,5 |
| | | | 95% de confiança $\rightarrow K =$ | | | 2,18 | média = | 268,0 |
| | | | incerteza expandida $U =$ | | | 10,94 | $U \% =$ | 4,1% |

Analisando-se os resultados obtidos neste posto de trabalho, verifica-se que os valores de contribuição para a incerteza das fontes relativas a diferentes medidores e ao desvio padrão das medições são semelhantes, enquanto que o valor da contribuição relativo à resolução do cronômetro é pequeno e pode ser considerado insignificante.

Esse mesmo comportamento foi observado em todos os postos de trabalho analisados. Portanto, dentre as três fontes de incerteza levantadas, a resolução do cronômetro pode ser desconsiderada, e a contribuição para a incerteza das outras duas fontes pode ser considerada aproximadamente igual.

Os resultados de incerteza expandida (valores numéricos e percentuais) para os diferentes postos de trabalho são apresentados no quadro 6.

Quadro 6 – Resultados das incertezas calculadas

| Posto de trabalho | Incerteza expandida U (s) | U % | Nº de amostras |
|-------------------|---------------------------|------|----------------|
| Carga de chassis | 10,94 | 4,1% | 472 |
| Rotate machine | 20,12 | 3,4% | 316 |
| Limpeza fina | 27,54 | 5,2% | 321 |
| Limpeza UF | 37,65 | 8,3% | 167 |
| Preparação e-coat | 69,91 | 7,9% | 145 |
| Pintura pó | 42,08 | 5,9% | 137 |

Avaliando-se os resultados de incerteza percentual, verifica-se que as incertezas são significativas, pois essa magnitude de variação pode ter influência importante no fluxo produtivo da fábrica. O menor resultado de incerteza foi obtido no posto Rotate machine, enquanto que o maior valor foi registrado para o posto Limpeza UF.

Ao contrário do que foi observado nos cálculos de valores de entrada (desvio amostral médio relativo aos diferentes medidores e desvio padrão das medições), nos resultados de incerteza pode ser estabelecida uma relação entre os valores obtidos e o número de amostras. Os três postos onde foram coletados maiores números de amostras apresentaram menores valores de incerteza, enquanto que as maiores incertezas foram calculadas para os três postos com menores números de amostras. Esse resultado aponta a ponderação efetuada pela metodologia utilizada no cálculo de incerteza, onde um maior número de amostras tende a reduzir a incerteza obtida em uma medição.

4. Conclusão

Este trabalho analisou o cálculo das incertezas relacionadas a medições de tempo e postos de trabalho de um ambiente industrial.

Haja visto que os tempos medidos nesses postos de trabalho são utilizados, muitas vezes, para determinação da capacidade produtiva de um processo produtivo, a avaliação das incertezas destas medições apresenta-se como uma estratégia importante a ser considerada na tomada de decisão em relação ao desempenho e capacidade produtiva da fábrica.

Dentre as fontes de incerteza avaliadas, a resolução do cronômetro teve uma influência insignificante, enquanto que as fontes relativas a diferentes medidores (pessoas) e ao desvio padrão das medições apresentaram uma influência significativa, sendo a contribuição das duas fontes aproximadamente igual.

Por meio dos resultados obtidos verificam-se números importantes de incerteza (mínimo de 3,4% e máximo de 8,3%), sendo que os mesmos podem influenciar significativamente as decisões estratégicas da fábrica. Estas decisões podem estar relacionadas à restrições de produção, capacidade de produção, e direcionamento de investimentos.

Como ponto a ser desenvolvido no trabalho, sugere-se uma análise complementar para mapeamento de uma maior abrangência das fontes de incerteza, assim como uma avaliação do grau de influência das mesmas.

Referências

AIAG, ASQC. **Measurement System Analysis. Reference Manual**, 3ª ed. Troy: Automotive Industries Action Group, 2002.

BALDO, C.R. **A Interação Entre o Controle de Processos e a Metrologia em Indústrias de Manufatura**. Florianópolis, 2003. Dissertação (Mestrado em Metrologia Científica e Industrial) área de Metrologia e Automatização, Universidade Federal de Santa Catarina.

BELANGER B.C. et al. **Traceability: an Evolving Concept. In: A Century of Excellence in Measurements**, Standards and Technology – A Chronicle on Selected NBS/NIST Publications 1901-2000, Ed.: D.R. Lide, Gaithersburg, NIST SP 958, 2000. p.167-171.

BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**, Geneva: International Organization for Standardization, 1993.

COMITÊ CONJUNTO PARA GUIAS EM METROLOGIA. **JCGM 100: Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição**. 2008.

GUM. **Guia para Expressão da Incerteza de Medição. Terceira Edição Brasileira do Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**. ISBN 85-07 -00251-X. Rio de Janeiro: INMETRO, ABNT, 2003, 120 p.

GUM SUPPL 1. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement GUM Supplement 1. Numerical Methods for the Propagation of Distributions. In accordance**

with the ISO/IEC Directives, Part 1, 2001, Clause A.5, this draft is submitted to the ISO national bodies for approval. International Organization for Standardization, 2005.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.