

**Reynaldo Lemos de Souza Filho**

**Ferramentas para projeto robusto aplicadas em uma empresa de correios**

**CURITIBA  
2009**

**Reynaldo Lemos de Souza Filho**

**Ferramentas para projeto robusto aplicadas em uma empresa de correios**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.**

**Área de Concentração: Gerência de Produção e Logística**

**Orientador: Prof. Dr. Guilherme Ernani Vieira**

**CURITIBA  
2009**

# **TERMO DE APROVAÇÃO**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha mãe, ACSIRES, *in memori*, e ao meu pai, Reynaldo, pelo carinho e pelos ensinamentos através dos bons exemplos de como conduzir a vida pautada na busca da felicidade, do amor e do respeito ao próximo.

Agradeço a minha família, em especial a minha doce esposa ELIANA, e meu querido filho, Reynaldo, que muito me incentivaram para a conclusão deste projeto.

Aos colegas do curso, que muito me apoiaram.

Ao professor Dr. Guilherme Vieira que, com a sua visão, experiência e pacientemente muito me apoiou durante o transcorrer do curso pelos caminhos da pesquisa científica.

Aos amigos e colegas de trabalho que muito me incentivaram para o sucesso deste projeto.

## RESUMO

A concorrência no segmento de distribuição de encomendas, no mercado mundial de correios esta cada vez mais acirrada. Hoje em dia o cliente busca um serviço com o menor preço, uma maior qualidade, melhor atendimento e o melhor prazo de entrega. Neste cenário, as respostas têm que ser rápidas e eficientes. Este é o principal fator para que as organizações busquem a robustez de seus processos para gerarem o máximo de lucro possível com mínimo custo. A proposta deste trabalho é a de contribuir na busca dessa robustez com a utilização dos métodos de Taguchi (matrizes ortogonais e razão sinal ruído), a metodologia superfície de resposta e a simulação computacional, para gerarem em conjunto um sistema robusto para um novo centro de triagem de encomendas expressas, isto é, um sistema menos sensível a perturbações. Foram testados diversos níveis de automação no processo de triagem com a variação dos tempos médios de processamento das encomendas (TMP), diferentes disponibilidades horárias da máquina de triagem de encomendas (“janela de tratamento”) e diferentes números de caminhões para serem usados no transporte de encomendas expressas de São Paulo até Curitiba (sede da empresa em estudo). Oito diferentes cenários foram testados e o cenário que se mostrou mais robusto quando do uso da primeira ferramenta (método Taguchi-matrizes ortogonais) foi o cenário 8 onde em relação ao cenário original- cenário 1, a triagem de encomendas começa uma hora mais cedo do que a usual, o número de caminhões deve ser aumentado em uma unidade e deve-se buscar uma melhora no TMP, de 1,29 segundos para 1,23 segundos. Entretanto, este método apresentou alguns problemas em relação aos cálculos relativos aos erros, não ficando muito claro se o cenário 6 ou cenário 8 era o mais robusto, apesar do cenário 8 possuir o maior índice de robustez. Na intenção de confirmar ou rejeitar os resultados obtidos utilizou-se o segundo método de análise (Razão sinal-ruído), o qual deixou claro que o cenário 6 era o cenário mais robusto, onde a triagem das encomendas começa uma hora mais cedo, o número de caminhões se manteve o mesmo que o cenário original (cenário 1) e deve-se buscar uma melhora no TMP, de 1,29 segundos para 1,23 segundos, e por último na intenção de refinar os dados do cenário 6 aplicou-se a ferramenta: Metodologia superfície de resposta, onde a “janela de tratamento” foi reduzida para 4,4 h, o número de caminhões foi aumentado em uma unidade e o TMP foi aumentado para 1,27 segundos. Esta pesquisa mostrou que além de obter um projeto robusto com o uso das ferramentas do método Taguchi também se podem maximizar estes resultados com o uso da ferramenta superfície de resposta.

**PALAVRAS CHAVE:** Método Taguchi, Desempenho, Superfície de resposta, Cadeia de Suprimentos

## ABSTRACT

The concurrence of the distribution segment to orders in the mail world market is increasingly getting sturdier and sturdier. Currently the client seeks for a service with the lowest price, higher quality, better service and the best delivery term. In this scenery, the answers have to be fast and efficient. This is the main factor for organizations to seek for hardiness of their procedures so that they can generate the highest possible profit with the least cost. This paper proposal is to contribute to the search of this hardiness by using Taguchi methods (orthogonal matrixes and signal-to-noise ratio), the answer surface methodology and the computational simulation, together to generate a sturdy system for a new triage center of express orders, that is to say, a less sensitive system to disturbance. Several automation levels were tested in the triage process with the variation of average time of order processing (TMP), different schedule availability of order triage machine ("window of treatment") and different number of trucks to be used in the transportation of express orders from São Paulo to Curitiba (headquarters of the studied enterprise). Eight different scenarios were tested and the scenery that showed to be sturdier at the use of the first tool (orthogonal matrixes Taguchi method) was scenery 8 where in relation to the original scenery - scenery 1, the order triage started one hour before the usual time, the number of trucks must have been increased in one unit and an improvement from 1.29 seconds to 1.23 seconds was necessary. However, this method showed some problems in relation to the calculations related to errors; it was not very clear if scenery 6 or 8 was the sturdiest, although scenery 8 showed higher rate of hardiness. Intending to confirm or reject the results, a second analysis method was used (signal-to-noise ratio), which was made clear that scenery 6 was the sturdiest one, where the order triage started one hour before the others, the number of trucks was the same as the original scenery (scenery 1) and an improvement was necessary in TMP from 1.29 seconds to 1.23 seconds, and at last, intending to refine data of scenery 6 the following tool was applied: Answer surface methodology, where "window of treatment" was reduced to 4.4 h, the number of trucks was increased in one unit and TMP was increased to 1.27 seconds. This research showed that besides obtaining a sturdy project by using tools of Taguchi method, these results could also be maximized with the use of the response surface tool.

**KEY WORDS:** Taguchi Method, Performance, Response surface, Supply Chain

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1- Etapas do estudo de caso.....	18
Figura 2- Fluxograma simplificado do CATE Paraná.....	20
Figura 3- Detalhamento dos resultados obtidos.....	22
Figura 4- Processo simplificado de planejamento tático .....	26
Figura 5- Passos da metodologia para a estimativa da robustez da cadeia de suprimentos..	35
Figura 6- Modelo de simulação do cenário atual do processo de importação no ARENA...	62

## LISTA DE TABELAS/ GRÁFICOS

Tabela 1- Situações relevantes para diferentes estratégias de pesquisa. ....	16
Tabela 2- Modos de perturbações.....	28
Tabela 3- Metas e tipos de desempenho da cadeia de suprimentos.....	31
Tabela 4- A menor matriz – L-4.....	34
Tabela 5- Diretriz para a seleção de projeto .....	43
Tabela 6- Coleta de dados.....	59
Tabela 7- Possíveis configurações do projeto.....	60
Tabela 8- Conjunto de cenários analisados.....	60
Tabela 9- Dois níveis para cada parâmetro incontrolável.....	61
Tabela 10- Resultado da simulação de todos os cenários.....	64
Tabela 11- Alocação de fatores e interação para L8, para a empresa de correios em estudo .....	65
Tabela 12- Computação da variação por L8, para o cenário 1.....	66
Tabela 13- A NOVA tabela para experimentos.....	67
Tabela 14- Importância dos pesos para o índice de robustez.....	68
Tabela 15- IR para todos os cenários analisados usando o desvio padrão como Estimativa de erro.....	68
Tabela 16- Parâmetros de projeto com matriz interna e matriz externa e os Resultados experimentais.....	71
Tabela 17 Resposta de cada nível dos fatores.....	72
Tabela 18- Cálculos da interação das características <i>small-the better</i> e <i>large-the-better</i> ..	74
Tabela 19- Medidas da eficiência obtidas no experimento para o ajuste do modelo de primeira ordem.....	76
Tabela 20- Análise de variância.....	77
Tabela 21- Medidas da eficiência (%) obtidas na direção de máxima inclinação ascendente.....	78

Tabela 22- Medidas da eficiência do CATE (%) para o ajuste do novo modelo de primeira ordem.....	79
Tabela 23- Análise de variância.....	79
Tabela 24- Medidas da eficiência do CATE para o ajuste do modelo de segunda ordem...	80
Tabela 25- Análise de variância.....	81
Tabela A1- Medidas do teor de pureza (%) para o ajuste do modelo de primeira ordem..	91
Tabela A2- Análise de Variância.....	94
Tabela A3- Medidas do Teor de Pureza obtidos na direção de máxima inclinação ascendente.....	95
Tabela A4- Medidas do teor de pureza (%) obtidas no experimento para o ajuste do novo modelo de primeira ordem.....	96
Tabela A5- Análise de variância .....	96
Tabela A6- Medidas do teor de pureza obtidas para o ajuste do modelo de segunda ordem .....	97
Tabela A7- Análise de variância.....	98

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1	OBJETIVO DO TRABALHO.....	13
1.1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	14
1.1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	14
1.3	METODOLOGIA.....	15
1.3.1	<b>Classificação geral</b> .....	15
1.3.2	<b>Seleção do método</b> .....	16
1.3.3	<b>Etapas da pesquisa</b> .....	18
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
<b>2</b>	<b>REFERÊNCIAL TEÓRICO</b> .....	24
2.1	CADEIA DE SUPRIMENTOS.....	24
2.2	ROBUSTEZ DA CADEIA DE SUPRIMENTOS.....	25
2.3	PRINCIPAIS CAUSAS, PROBLEMAS E INSTABILIDADE DA CADEIA DE SUPRIMENTOS.....	27
2.4	MENSURAÇÃO DO DESEMPENHO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS.....	30
2.5	MÉTODOS TAGUCHI PARA PROJETOS DE ROBUSTEZ E PROJETO EXPERIMENTAL.....	32
2.5.1	<b>Entendendo o método Taguchi (projeto robusto)</b> .....	32
2.5.2	<b>Matrizes ortogonais</b> .....	33
2.5.3	<b>Revisão da Metodologia para a Estimativa da Robustez da Cadeia de Suprimentos</b> .....	34
2.5.3.1	Definição do Indicador Chave de Desempenho.....	35
2.5.3.2	Definição dos parâmetros incontroláveis.....	36

2.5.3.3	Definição dos parâmetros e cenários de projeto, controláveis.....	36
2.5.3.4	Modelagem do ruído ( <i>noise</i> ): dois níveis de fatores incontroláveis .....	36
2.5.3.5	Quantificação da robustez da cadeia de suprimentos: índice de robustez.....	36
2.5.3.6	Definição do nível de significância (por F-teste, intervalo de confiança e números de replicações).....	37
2.5.3.7	Criação das matrizes ortogonais e fatores <i>confounding</i> (F-teste).....	38
2.5.3.8	Análise da entrada dos dados .....	38
2.5.3.9	Desenvolvimento e validação do modelo de simulação do cenário atual.....	38
2.5.3.10	Desenvolvimento de cenários alternativos.....	39
2.5.3.11	Execução das experiências de simulação e dos resultados nas tabelas F-testes.....	39
2.5.3.12	Cálculo da Robustez (IR) para todos os cenários, análise de desempenho final e comparações.....	39
<b>2.5.4</b>	<b>Razão sinal-ruído (<i>signal-to-noise-ratio</i> ou razão SN).....</b>	<b>40</b>
2.6	MÉTODO SUPERFÍCIE DE RESPOSTA.....	43
<b>2.6.1</b>	<b>Método da máxima inclinação ascendente/descendente.....</b>	<b>44</b>
2.7	FUNDAMENTOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	50
2.8	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA AOS CORREIOS.....	52
2.9	RESUMO.....	54
<b>3</b>	<b>APLICAÇÃO E ANÁLISE DOS MÉTODOS APRESENTADOS.....</b>	<b>56</b>
3.1	MÉTODO TAGUCHI (MATRIZES ORTOGONAIS).....	56
<b>3.1.1</b>	<b>Aplicação da metodologia para estimativa da robustez da cadeia de suprimentos</b>	<b>56</b>

3.1.1.1	Definir indicador chave de desempenho.....	57
3.1.1.2	Definir parâmetros controláveis de projeto.....	58
3.1.1.3	Definir dos parâmetros incontroláveis que afetam a robustez do projeto.....	60
3.1.1.4	Modelar o ruído.....	60
3.1.1.5	Criar matrizes ortogonais e o delineamento de experimento.....	65
3.1.1.6	Executar os experimentos de simulação e análises F-testes.....	68
3.1.1.7	Calcular a robustez para todos os cenários.....	68
3.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO TAGUCHI (RAZÃO SINAL-RUÍDO).....	69
3.2.1	<b>Combinar os fatores controláveis com fatores incontroláveis usando matriz ortogonal para a obtenção da combinação ótima.....</b>	69
3.3	APLICAÇÃO DO MÉTODO SUPERFÍCIE DE RESPOSTA.....	75
3.3.1	<b>Definição dos fatores para o ajuste do modelo de primeira ordem.....</b>	75
3.3.2	<b>Utilizar as informações obtidas na etapa anterior para determinar a direção de máxima inclinação ascendente.....</b>	77
3.3.3	<b>Ajustar o modelo de segunda ordem.....</b>	80
4	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	83
4.1	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	84
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	85
	<b>APÊNDICE.....</b>	90

# 1 INTRODUÇÃO

A concorrência no segmento de distribuição de encomendas, no mercado mundial de correios esta cada vez mais acirrada. Hoje em dia o cliente busca um serviço com o menor preço, uma maior qualidade, melhor atendimento e o melhor prazo de entrega. Neste cenário, as respostas têm que ser rápidas e eficientes ao mercado.

Hoje com o mercado globalizado, todas as grandes empresas de correios, como por exemplo: a USPS (*United States Postal Service*), a UPS (*United Postal Service*), Fedex, DHL e a Empresa de Correios e Telégrafos Brasileira estão muito preocupadas com a alta competitividade de seus mercados, sendo que os seus milhões de clientes querem que as suas cartas e encomendas cheguem aos destinos rapidamente e sem danos.

Antes da década de 90, a prestação de um serviço, para a empresa de correios em estudo, era vista como uma simples sucessão de operações, sem qualquer conotação de agregação de valor em cada etapa do processo de produção. Já a partir da década de 90 esta empresa passou a dar maior ênfase na produção de correios como uma “fábrica de serviços” com a instalação de centros automatizados de tratamento de encomendas (CATE), na intenção de diminuir os seus custos e maximizar a sua eficiência operacional por todo o país. No total, a empresa instalou vinte e sete CATEs distribuído por dez diretorias regionais. Este estudo foca em uma dessas dez diretorias regionais, especificamente no CATE d a regional situada no estado do Paraná, Curitiba.

Esta opção pela instalação de centros automatizados não é uma opção isolada do correio brasileiro, conforme Buckthought, *et al.* (1978), o correio do Canadá, também enfrentou sérios problemas dentro da triagem e distribuição de correios e com a satisfação dos clientes, e para resolver estes problemas criaram um programa de mecanização das plantas de processamento de correios.

Por outro lado esta modernidade traz problemas complexos e que devem ser resolvidos rapidamente, sob pena de perder o espaço nesse mercado de disputa acirrada, porém os custos e riscos são elevados.

## 1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

Nesta etapa será realizada a descrição do objetivo geral e dos objetivos específicos deste trabalho.

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é modelar e avaliar a eficiência da cadeia de suprimentos de uma das regionais do sul do país de uma empresa do setor de correios, com a utilização das ferramentas do método Taguchi (matrizes ortogonais e razão sinal ruído), a ferramenta superfície de resposta e simulação computacional, buscando a configuração mais robusta para o setor de triagem da empresa de correios em estudo, isto é, para que seja a mais insensível possível a perturbações externas incontrolláveis.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Utilizar a simulação discreta como ferramenta de modelagem para descrever todas as relações funcionais entre os fatores para realizar um compêndio das informações;
- Utilizar a ferramenta matrizes ortogonais, do método Taguchi, ferramenta esta que permite o máximo de informações com o mínimo de possível de “corridas”;
- Utilizar a ferramenta razão sinal ruído, do método Taguchi, visando confirmar ou rejeitar o resultado obtido com a ferramenta matrizes ortogonais;
- Utilizar a ferramenta superfície de resposta, visando o refinamento do resultado obtido com a ferramenta razão sinal ruído;
- Contribuir para estabelecer um modelo que gere informações ao tomador de decisão na busca da melhoria contínua, visando o máximo de lucro possível com um mínimo custo.

Este trabalho está relacionado somente às atividades de importação (encomendas que chegam ao CATE oriundas das outras regionais da empresa, para serem triadas e distribuídas na região sob a coordenação deste CATE (Curitiba e região metropolitana)), além da importação este projeto também ficará restrito as encomendas chamadas expressas ou urgentes e mecanizadas originada da regional de São Paulo (que representa 70% de toda a importação).

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Este projeto de pesquisa se justifica pela falta de modelos que possam servir para a análise do desempenho de um centro de tratamento de encomendas em uma empresa de correios, que considerem toda a complexidade destes centros, principalmente no que se refere

às variações inesperadas dentro da cadeia de suprimentos, como quebra de máquinas, falhas no abastecimento, demandas imprevistas, atrasos ou quebras no transporte, falta de energia, absenteísmo, greve de funcionários, etc.

Os investimentos em unidades de tratamentos de correios são muitos altos e os atuais sistemas tratam as variações inesperadas individualmente. Enquanto que Taguchi preocupa-se com essas variações e procura minimizá-las e também interagi-las.

Com a aplicação destas ferramentas, este projeto de pesquisa buscará minimizar estes investimentos e reduzir os seus riscos.

## 1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA

### 1.3.1 Classificação Geral

Segundo Santos (2000), denominam-se procedimentos (ou metodologia) as atividades práticas necessárias para a aquisição dos dados com os quais se desenvolverão os raciocínios, que resultarão em cada parte do trabalho final, ou seja, planeja-se aqui de forma correta.

Na prática, a identificação dos procedimentos é feita indicando-se as atividades de coleta que serão desenvolvidas (pesquisa bibliográfica, experimento, levantamento, estudo de caso e pesquisa documental).

Segundo GIL (2002), toda pesquisa se inicia com algum tipo de problema, ou indagação. Ainda segundo este autor, é usual a classificação das pesquisas com base em seus objetivos gerais em três grandes grupos:

**Pesquisa exploratória:** cujo objetivo principal é o aprimoramento das idéias ou a descoberta de intuições. Embora o planejamento da pesquisa exploratória seja bastante flexível, na maioria dos casos assume a forma de pesquisa bibliográfica ou de estudo de caso.

**Pesquisa descritiva:** Tem como objetivo primordial as descrições das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento relações entre variáveis. Também são pesquisas descritivas aquelas que visam descobrir a existência de associações entre variáveis, como, por exemplo, as pesquisas eleitorais que indicam a relação entre preferência político partidário e nível de rendimento ou de escolaridade. Entre os inúmeros estudos que podem ser classificados sob este título destacam-se as técnicas padronizadas de coleta de dados, tais como questionário e observação sistemática.

**Pesquisa explicativa:** estas pesquisas têm por preocupação central identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Esse é o tipo de pesquisa que mais aprofunda o

conhecimento da realidade. A maioria das pesquisas deste grupo pode ser classificada como experimentais e *ex-post-facto*.

Com relação aos procedimentos técnicos utilizados, GIL (2002), classifica da seguinte maneira:

Pesquisa bibliográfica; Pesquisa documental; Pesquisa experimental; Pesquisa ex-post-facto; Estudo de Coorte; Levantamento; Estudo de campo; Estudo de caso; Pesquisa-ação; Pesquisa participante.

### 1.3.2 Seleção do Método

Para YIN (2005), há três condições na escolha de uma metodologia:

- a) Tipo de questão de pesquisa proposta
- b) Extensão que o pesquisador tem sobre eventos comportamentais atuais
- c) Grau de enfoque em acontecimentos contemporâneos (que é do tempo atual, segundo dicionário MICHAELIS) em oposição a acontecimentos históricos.

A Tabela 1 apresenta o relacionamento das três condições citadas acima com as cinco principais estratégias:

**Tabela 1:** Situações relevantes para diferentes estratégias de pesquisa

<b>Estratégia</b>	<b>Forma de questão de pesquisa</b>	<b>Exigem controle sobre eventos comportamentais</b>	<b>Focaliza acontecimentos contemporâneos</b>
<b>Experimento</b>	como, por que	sim	sim
<b>Levantamento</b>	quem, o que, onde, quantos, quanto	não	sim
<b>Análise de arquivos</b>	quem, o que, onde, quantos, quanto	não	sim/não
<b>Pesquisa histórica</b>	como, por que	não	não
<b>Estudo de caso</b>	como, por que	não	sim

Buscando uma relação entre o problema e a metodologia, observa-se que as estratégias que se enquadram na forma de questão da pesquisa “como”, são as estratégias: Experimento, Pesquisa histórica e Estudo de caso.

Segundo YIN (2005), o estudo de caso conta com muitas técnicas utilizadas pelas pesquisas históricas, mas acrescenta duas fontes de evidências que usualmente não são incluídas no repertório de um historiador: observação direta dos acontecimentos que estão sendo estudados e entrevistas das pessoas nele envolvidas. Ainda segundo este autor, os estudos de casos estão muito longe de serem apenas uma estratégia exploratória. Alguns dos melhores e mais famosos estudos de casos foram tanto exploratórios quanto descritivos.

De acordo com SANTOS (2000), o estudo de caso é a estratégia escolhida quando se seleciona um objeto de pesquisa restrito, com o objetivo de aprofundar-lhe os aspectos característicos, cujo objeto pode ser qualquer fato ou fenômeno individual, ou um de seus aspectos.

Para Tomasi e Yamamoto (1999), estudo de caso tem por objetivo aprofundar a descrição de determinada realidade. O tratamento estatístico é simples quando a análise é quantitativa. A análise qualitativa pode ter apoio quantitativo.

Segundo Yin (2005), um protocolo (registro de atos públicos, segundo Aurélio, 1993) para um estudo de caso é mais que um instrumento. O protocolo contém o instrumento, mas também contém os procedimentos e as regras gerais que deveriam ser seguidas ao utilizar o instrumento.

Ainda segundo este autor, de uma forma geral, o protocolo do estudo de caso deve apresentar as seguintes seções:

- Visão geral do projeto do estudo de caso (objetivos e patrocínios do projeto, questões do estudo de caso e leituras importantes sobre o tópico que está sendo investigado).
- Procedimentos de campo (apresentações das credências, acesso aos “locais” do estudo de caso, fontes gerais de informações e advertências de procedimentos).
- Questões do estudo de caso (as questões específicas que o pesquisador do estudo de caso deve manter em mente ao coletar os dados, planilha para disposição específica e as fontes em potencial de informações ao se responder cada questão).
- Guia para o relatório do estudo de caso (esboço, formato para os dados, uso e apresentação de outras documentações, e informações bibliográficas).

Segundo Yin (2005) devem ser utilizadas técnicas analíticas que visam analisar os estudos de caso. Uma estratégia destacada por ele é a utilização de “modelos lógicos”. O uso de

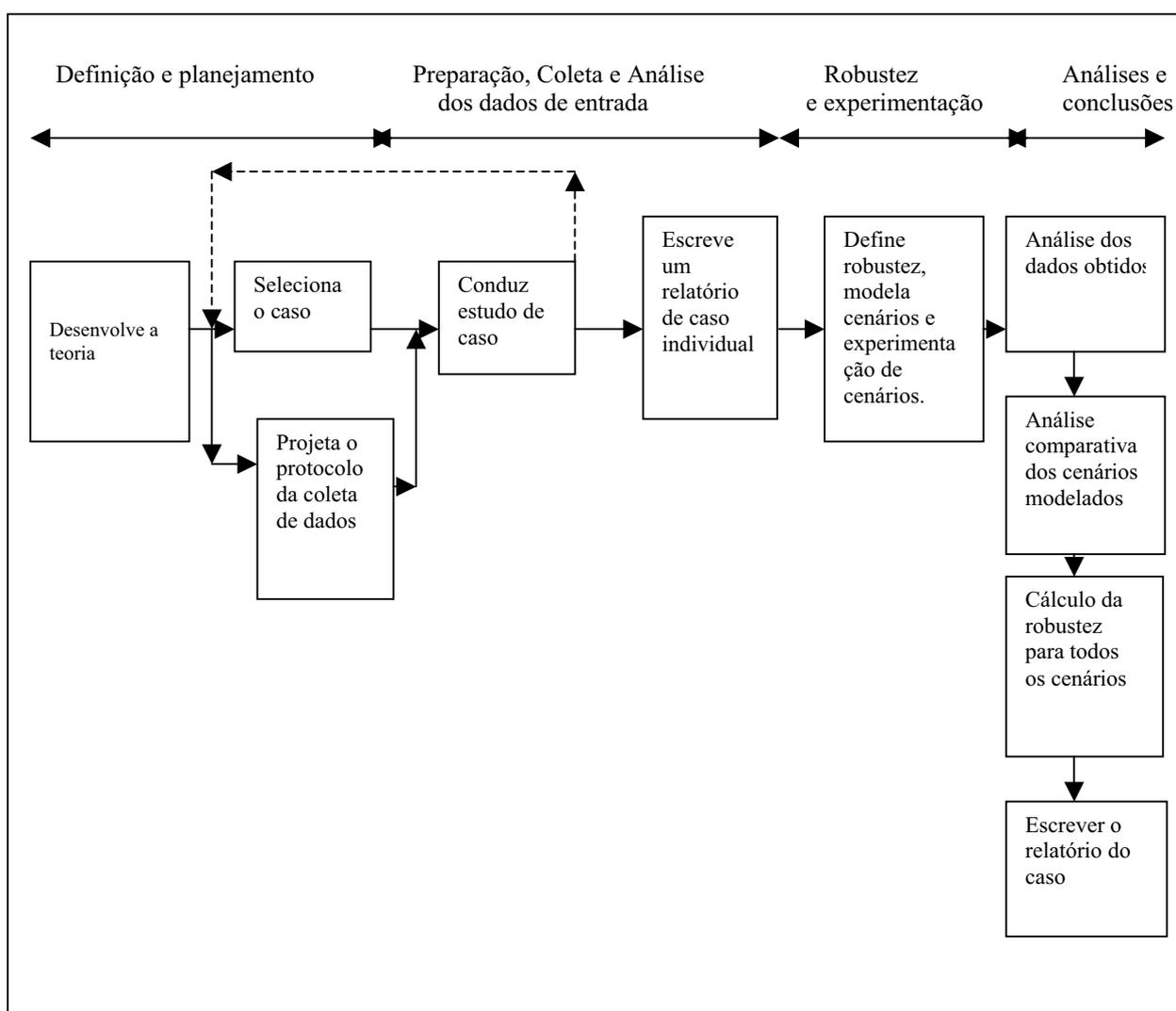
modelo lógico como técnica analítica consiste em comparar eventos empiricamente observados com eventos teoricamente previstos.

Este trabalho utilizará o método Taguchi, analisando e aplicando suas duas ferramentas (matrizes ortogonais e razão sinal-ruído), a ferramenta Superfície de Resposta e simulação computacional, para atender esta etapa proposta por Yin (2005).

Considerando que o presente trabalho apresenta um objeto de pesquisa restrito, o CATE, e possui o objeto de aprofundar os aspectos característicos, o estudo de caso se mostra como uma metodologia adequada.

### 1.3.3 Etapas da Pesquisa

Baseado em YIN (2005), as etapas do estudo de caso são as seguintes, conforme a Figura 1 a seguir:



**Figura 1:** Etapas do estudo de caso

Fonte: Baseado em YIN (2005)

:

As etapas deste trabalho serão as seguintes:

- Após o desenvolvimento da teoria sobre projeto robusto, a próxima etapa é a seleção do caso para estudo;

- A etapa seguinte será a elaboração do protocolo de pesquisa, cujo os passos são os seguintes, conforme YIN (2005):

a) Visão geral do projeto do estudo de caso:

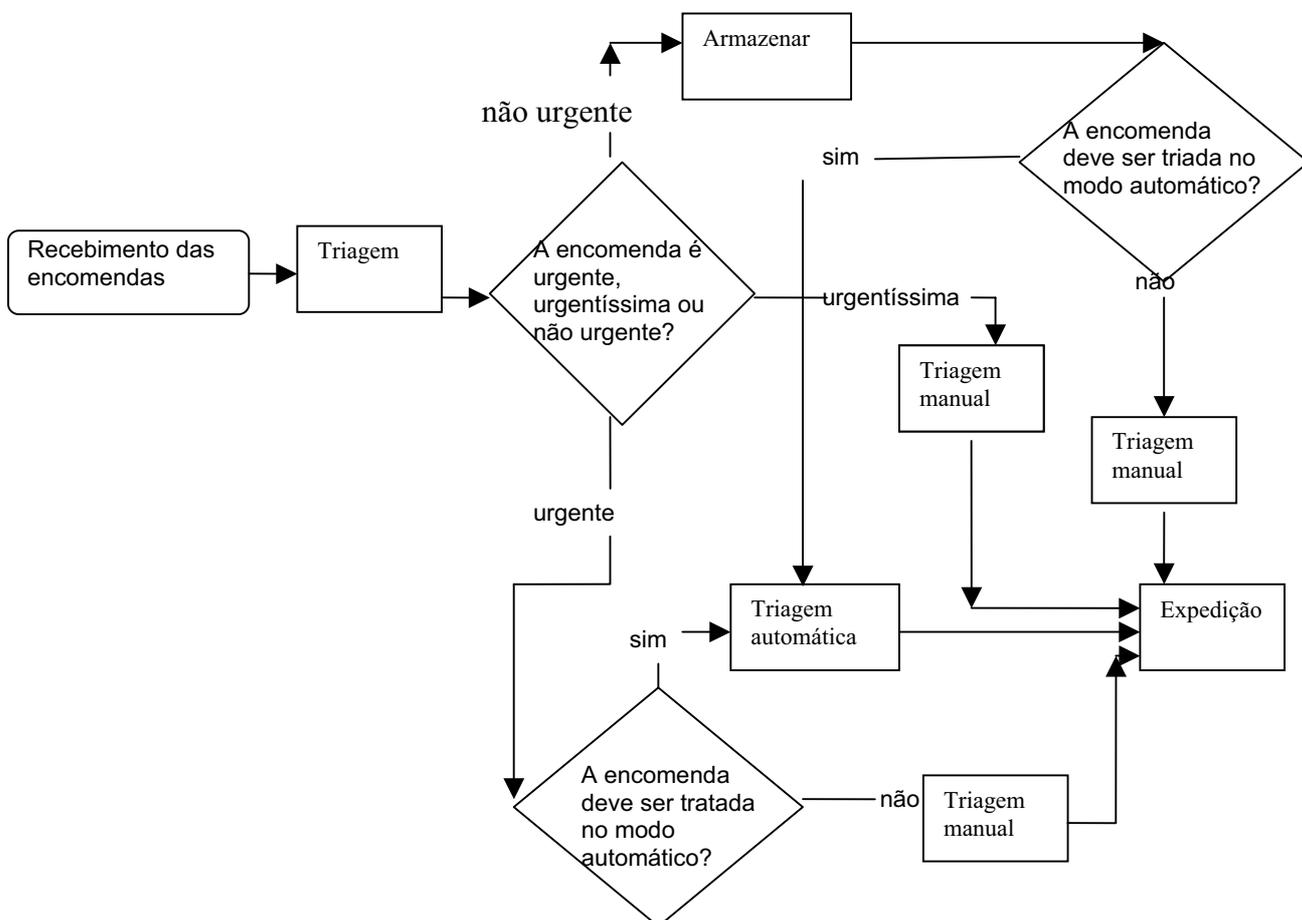
Um dos segmentos da empresa em estudo é oferecer o serviço de correio expresso, ou seja, serviço de entrega urgente. Os clientes pagam mais caro por este serviço expresso do que outro de entrega normal, porém os clientes esperam que suas encomendas cheguem muito mais rápidas.

Devido a sua natureza, este tipo de serviço exige um planejamento cuidadoso, de controle e execução. Durante o mês de dezembro, por exemplo, cerca de 15.000 encomendas expressas chegam diariamente ao CATE da regional Paraná, originadas de São Paulo, isto acontece diariamente até as vésperas do natal.

Na regional do Paraná, Curitiba, o CATE, centro automático de tratamento de encomendas, possui uma grande máquina de triagem com vários colaboradores para triar e expedir as encomendas para 45 direções diferentes na capital do estado e região metropolitana (para o plano de importação-encomendas que chegam ao CATE).

A máquina de triagem é programada conforme a conveniência dos horários e a programação para estes trabalhos são chamadas de plano, sendo que existe o plano de importação e exportação para encomendas urgentes e o plano de encomendas não urgentes.

A Figura 2 dá uma visão geral do CATE, desde o recebimento/d Descarregamento da carga, triagem (se é carga urgente, urgentíssima ou não urgente, se é mecanizada ou manual), triagem mecanizada e finalmente a expedição da carga para os diversos destinos. Destaca-se que as encomendas urgentes (manual e mecanizada) e as encomendas urgentíssimas são deslocadas diretamente para os seus respectivos locais de tratamento, logo após a sua chegada no CATE, ou seja, não fica armazenada a espera de triagem.



**Figura 2:** Fluxograma simplificado do CATE-Centro de Tratamento de Encomendas-Paraná

A empresa em estudo está consciente da necessidade de estar preparada para lidar com as incertezas e sabe que ser robusta poderá fazer uma grande diferença no final. Devido ao aumento esperado da demanda e o aumento do tráfego da rodovia que liga São Paulo e Curitiba, a regional tem que descobrir novas estruturas (cenários) para a sua cadeia de suprimentos, para que possa cumprir com as expectativas dos clientes. Para isso a regional considera a possibilidade de aumentar o atual número de caminhões que transportam as encomendas urgentes, melhorar o seu atual nível de automatização e expandir o número de horas disponíveis no serviço de triagem da importação na planta de Curitiba.

Este trabalho pretende mostrar qual será a melhor configuração, a mais robusta, no futuro próximo.

b) Procedimentos de campo:

A coleta de dados foi realizada no CATE da regional em estudo, primeiramente foi coletado os dados referente ao mês de dezembro de 2006, o qual foi o recorde em termos de quantidade triada.

Após a análise dos dados foi realizada uma segunda coleta de dados, desta vez no CATE da melhor regional do Brasil, também referente ao mesmo mês pesquisado anteriormente (dezembro de 2006).

Quanto aos nomes das pessoas de contato, apenas o próprio autor deste trabalho foi responsável pelas informações coletadas, pois o mesmo trabalha na empresa em estudo.

c) Questões do estudo de caso:

Após a coleta dos dados, surgiram as seguintes questões:

- Como obter um modelo de simulação para a criação de novos cenários, para lidar com as variações inesperadas, tais como: paradas ou quebras da máquina de triagem automática de encomendas, aumento da demanda, atrasos motivados por acidentes na rodovia que liga o centro sul ao sul do país ou quebras de veículos que transportam estas encomendas (veículos leves ou pesados), falta de energia, absenteísmo, greve com paralisações da mão-de-obra, atrasos na rede postal noturna motivado por manutenção da aeronave ou por condições meteorológicas, etc.?

Da mesma maneira com as variações esperadas, como por exemplo: o tempo médio de processamento de uma encomenda (TMP), o número de caminhões utilizados entre São Paulo e Curitiba e a “janela de tratamento” utilizada no CATE para a triagem automática das encomendas?

Após a ponderação dos fatores citados acima, baseados apenas na experiência do pesquisador, foram eleitos os parâmetros do sistema, sendo os parâmetros controláveis:

- “janela de tratamento”
- Nível de automação (TMP)
- Número de caminhões

E os parâmetros incontroláveis os seguintes:

- Percentual de aumento da demanda
- Probabilidade de um único caminhão atrasar
- Tempo médio de reparos na máquina de triagem
- Probabilidade de um único caminhão atrasar

Uma outra questão que surgiu foi como desenvolver cenários alternativos (em busca do mais robusto cenário)?

Normalmente, os modelos de simulação de cenários alternativos são muito semelhantes ao cenário atual do modelo de simulação. No caso da regional em estudo, para cada oito cenários considerados, oito tipos de experimentos de simulação foram executados.

d) Guia para o relatório do estudo de caso:

- O esboço para os resultados que serão obtidos está detalhado na Figura 3, onde será analisado o resultado do uso de cada ferramenta para os três parâmetros controláveis.

FERRAMENTAS	Cenário mais robusto	Parâmetros controláveis			EFICIÊNCIA (Y)
		A- (horas) "janela de tratamento"	B- (unidade) nº de caminhões	C- (segundos) nível de automação TMP	
1- Método Taguchi (matrizes ortogonais)					
2- Método Taguchi (razão sinal-ruído)					
3- Superfície de resposta					
	Cenário Original (cenário 1)				

**Figura 3** - Detalhamento dos resultados obtidos

- Na seqüência buscar-se-á o desenvolvimento da pesquisa, conforme os seguintes passos:

- Aplicação da primeira ferramenta do método Taguchi (matrizes ortogonais) aliada com a nova metodologia proposta por Vieira e Lemos (2009a) e simulação computacional, será revisada no capítulo 2 e aplicada no capítulo 3.
- Aplicação da segunda ferramenta do método Taguchi (Razão sinal-ruído- *signal-to-noise*), será revisada no capítulo 2 e aplicada no capítulo 3.
- Aplicação da terceira e última ferramenta: Método Superfície de Resposta será revisada no capítulo 2 e aplicada no capítulo 3.

- A última etapa da pesquisa será as considerações finais, citando a contribuição fruto deste trabalho, será descrita no capítulo 4.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1- INTRODUÇÃO: apresenta a proposta da pesquisa, as questões a serem respondidas pelo presente estudo, a justificativa da pesquisa, a metodologia, a classificação geral da metodologia, a seleção do método de pesquisa, as etapas da pesquisa e a estrutura do trabalho.

Capítulo 2- REFERÊNCIAL TEÓRICO: apresenta os assuntos pertinentes ao escopo da pesquisa, como por exemplo: Cadeia de suprimentos, Robustez da cadeia de suprimentos, mensuração do desempenho da cadeia de suprimentos, métodos Taguchi para projetos de robustez e projeto experimental, contemplam a revisão da metodologia proposta por Vieira e Lemos (2009b) com base em matriz ortogonal, e simulação computacional, cujo objetivo é a estimativa da robustez do sistema, baseada no uso de diversas ferramentas, a saber: parâmetros de projeto robusto de Taguchi; matrizes ortogonais, uma nova fórmula do índice de robustez; simulação discreta e intenso uso de planilhas de cálculo (planilhas no software Excel), a segunda ferramenta do método Taguchi, Razão sinal- ruído, e o Método Superfície de Reposta, onde é apresentado o refinamento do resultado obtido pelos métodos Taguchi (Razão sinal-ruído).

Capítulo 3- APLICAÇÃO E ANÁLISE DOS MÉTODOS APRESENTADOS: apresenta as aplicações dos métodos Taguchi (matrizes ortogonais e Razão sinal-ruído) na análise do projeto robusto, Aplicação do método Superfície de resposta na análise do projeto robusto.

Capítulo 4- CONSIDERAÇÕES FINAIS: Comparações das metodologias usadas com um parecer final.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo será um apanhado teórico para fundamentar as ferramentas e conceitos abordados neste trabalho. O referencial teórico será sobre os seguintes assuntos: cadeia de suprimentos, robustez da cadeia de suprimentos, principais causas dos problemas e instabilidade da cadeia de suprimentos, mensuração do desempenho da cadeia de suprimentos, método Taguchi para projetos de robustez e projeto experimental, projeto robusto, matrizes ortogonais, revisão da metodologia para a estimativa da robustez da cadeia de suprimentos, razão sinal-ruído-SN, método superfície de resposta, fundamentos da simulação computacional e simulação computacional aplicada aos correios.

### 2.1 CADEIA DE SUPRIMENTOS

Segundo Chopra e Meindl (2003), uma cadeia de suprimentos engloba todos os estágios envolvidos, direta ou indiretamente, no atendimento de um pedido de um cliente. A cadeia de suprimentos não inclui apenas fabricantes e fornecedores, mas também transportadoras, depósitos, varejistas e os próprios clientes.

Segundo Christopher (*apud* Mentzer *et al.*, 2001), cadeia de suprimentos é uma rede de organizações que estão envolvidas através de links à montante e à jusante, dentro de diferentes processos e atividades que produzem valor em forma de produtos e serviços entregues ao último consumidor.

Mentzer *et al.* (2001), define cadeia de suprimentos como um conjunto de três ou mais entidades (organizações ou indivíduos) diretamente envolvidos dentro de um fluxo *upstream* (à montante) ou *downstream* (à jusante), serviços, finanças, e/ou informação da fonte até o cliente.

Chopra e Meindl (2003) definem que o objetivo de uma cadeia de suprimentos é o de maximizar o valor global gerado. O valor gerado por uma cadeia de suprimentos é a diferença entre o valor do produto final para o cliente e o esforço realizado pela cadeia de suprimentos para atender o seu pedido. Para a maioria das cadeias de suprimentos comerciais, o valor estará fortemente ligado à lucratividade da cadeia de suprimentos.

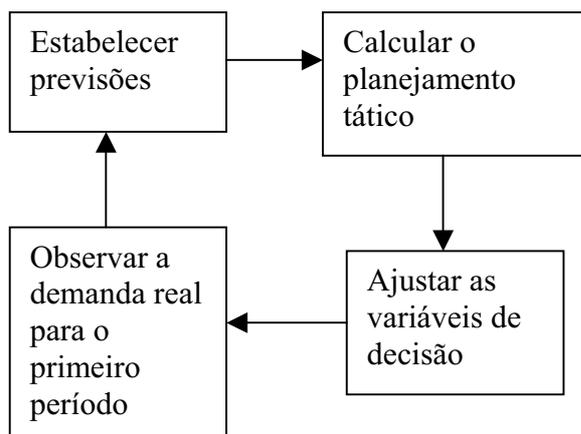
Para o *Global Supply Chain Forum* (2008), o gerenciamento da cadeia de suprimentos é a integração dos processos de negócio chaves desde o usuário final até os fornecedores originais (primários) que providenciam produtos, serviços e informações que adicionam valor para os clientes e *stakeholders* (todos os interessados).

## 2.2 ROBUSTEZ DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

Segundo Vieira e Lemos (2009b), o objetivo da robustez da cadeia de suprimentos é o de assegurar que a cadeia funcione bem em toda a sua plenitude em uma ampla variedade de situações, que leva a minimização dos riscos dos resultados indesejáveis. Ainda para estes autores, a demanda não é cem por cento previsível, e conseqüentemente para o melhor sistema de previsão sempre terá erros. Portanto se a cadeia atinge níveis inesperados de variação, a cadeia de suprimentos deve ser robusta o suficiente para lidar com esta variação, afim de que os resultados indesejáveis possam ser minimizados.

Segundo Gaonkar (*apud* Vieira e Lemos, 2009b), as cadeias de suprimento precisam ser robustas em três níveis, estratégico, tático e operacional, e que eles precisam ser capazes de lidar com o menor desvio de regularidade de funcionamento e com as importantes perturbações para cada um desses níveis, por exemplo, para o nível operacional, as empresas exigem sistemas de apoio à decisão que podem atuar sobre a informação a partir de vários parceiros referente a vários desvios e interrupções que acabem em reprogramar atividades. Para o nível tático, os planos precisam ter redundâncias em termos de recursos humanos, máquinas e também logística e suprimento das organizações. Para o nível estratégico, parceiros mais confiáveis com capacidades intrínsecas na manipulação em desvios e perturbações, e as habilidades e capacidade de adaptar-se a evolução do mercado será preferida e selecionada. Modelos de projetos de cadeias de suprimentos determinam decisões estratégicas, como a melhor relação custo-benefício na localização das instalações (incluindo fábricas e centro de distribuição), fluxos de mercadorias, serviços, informações e recursos em toda a cadeia de suprimentos e atribuição dos clientes para os centros de distribuição, de acordo com Mo e Harrison (*apud* Vieira e Lemos, 2009b).

Segundo Genin *et al.* (2008), no planejamento tático, em cada ciclo de reprogramação, as novas previsões são estabelecidas de acordo com a demanda para o primeiro período, conforme o processo simplificado de planejamento tático descrito na Figura 4.



**Figura 4** Processo simplificado de planejamento tático

Fonte: Genin *et al.* (2008)

De acordo com Flolkes e Creveling (*apud* Genin *et al.*, 2008), o principal ponto do método de Taguchi é o de ao invés de eliminar ou reduzir as causas da variabilidade de um produto ou processo, tem por objetivo adaptar-se a concepção do produto ou processo de modo que a eficiência seja insensível às variações incontroláveis.

A fim de adaptarem-se rapidamente às flutuações da demanda do mercado, a alocação de recurso e a programação (configuração) de um sistema de manufatura flexível (FMS- *Flexible manufacturing system*) não devem ser simplesmente otimizadas para o atual plano de produção. Ao invés disso, elas devem ser idealmente otimizadas para a robustez contra a variação nos planos da produção, de modo que o sistema possa lidar com a variação com a mínima reconfiguração, segundo Saitou (*apud* Vieira *et al.* 2009b).

De acordo com Saitou e Malpathak (*apud* Vieira e Lemos, 2009b), robustez do FMS é definida especificamente como a insensibilidade do desempenho da produção contra variações dentro do plano de produção.

Segundo Vieira e Lemos, (2009b), para a cadeia de suprimentos ser considerada robusta, não é suficiente ter somente um único elo da cadeia robusto, mas todos os principais participantes da cadeia de suprimentos devem lutar para a robustez como uma unidade. A robustez da cadeia de suprimentos depende muito da cooperação (colaboração) dos seus participantes.

Para Vieira *et al.* (2009), uma cadeia de suprimentos robusta manterá o custo unitário do serviço apesar das variações (*noises*) para os parâmetros não-controláveis da cadeia de

suprimentos, ou seja, a robustez da cadeia de suprimentos será insensível às variações para alguns dos parâmetros não-controláveis, dentro de um determinado nível de significância.

### 2.3 PRINCIPAIS CAUSAS DOS PROBLEMAS E INSTABILIDADE DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

Para Vieira e Lemos. (2009b), fatores aleatórios em uma cadeia de suprimentos podem alcançar níveis indesejáveis, afirmando a necessidade de uma cadeia de suprimentos projetada e operada para a robustez. Alguns dos problemas que causam instabilidade e perturbação ao desempenho do sistema estão relacionados com os seguintes fatores:

- *Lead- time* do fornecedor ou prazos de entrega.
- Má qualidade dos produtos recebidos dos fornecedores.
- Variações na demanda.
- Perturbação na produção devido às falhas aleatórias na máquina, trabalhadores em greve, severas condições meteorológicas.

A classificação dos modos de perturbações que ocorrem na cadeia de suprimentos, causando instabilidade e degenerações no desempenho estão descritos na Tabela 2, a seguir.

**Tabela 2.** Modos de perturbações

<b>Modos de Perturbações</b>	<b>Descrição</b>
Oferta	Atraso ou indisponibilidade de matérias de fornecedores, conduzindo a uma escassez de fatores de produção que poderiam paralisar a produção.
Meios de transporte	Atraso ou indisponibilidade de um ou outro transporte de entrada do processo ou saída da do processo para transportar mercadorias devido a um acidente com o transportador ou problemas meteorológicos.
Instalações	Quebra de máquina, falta de água ou de força conduzindo para o atraso ou indisponibilidade da fábrica.
Falhas no frete ou nas parcerias	Violação da integridade das cargas, produtos podem ser roubados ou ter intenção criminosa (como por exemplo, contrabando de armas).
Falhas de comunicação	Falhas na infra-estrutura de informação e comunicação devido à linha, falhas nos hardware dos computadores ou softwares ou ataque de vírus, conduzindo a incapacidade de coordenar as operações e executar as transações.
Flutuações desenfreadas da demanda	Súbita perda de demanda devido à retração econômica, falência da companhia, guerra, etc.

Fonte: Gaonkar e Viswanadham (*apud* Vieira e Lemos, 2009b)

Ainda segundo estes autores, com base na sua natureza, a incerteza da cadeia de suprimentos pode manifestar-se em três grandes formas: desvio, interrupção e desastre. É dito que há um desvio quando ocorre que um ou mais parâmetros, tais como custo, demanda, ou tempo de espera (*lead-time*) dentro da cadeia de suprimentos desviando-se de seu valor esperado ou médio, sem quaisquer mudanças à estrutura essencial da cadeia de suprimentos. A perturbação ocorre quando a estrutura da cadeia de suprimentos é radicalmente transformada, através de uma não-disponibilidade de determinada produção, armazém e instalações de distribuição ou opções de meios de transporte devido a acontecimentos imprevistos causados pelo homem ou natureza. Um desastre é definido como desligamento temporário irrecuperável da rede da cadeia de suprimentos devido a imprevistos catastróficos. A seguir alguns exemplos, citados por esses autores:

Incertezas da cadeia de suprimentos:

- Na demanda
- Na oferta
- Na compra, produção e custos logísticos.
- No transporte e tempos de espera (*lead-times*).
- Interrupções
- Na produção (produção de componentes é interrompida devido a incêndio na fábrica do fornecedor da Toyota no México resultando em desligamento a jusante da fábrica).
- No fornecimento (fornecimento de carne foi interrompido devido à propagação da doença febre aftosa na Inglaterra).
- Na logística (porto dos Estados Unidos interrompeu temporariamente o transporte de componentes da Ásia para os Estados Unidos).
- Desastres
- Ação terrorista (a totalidade da economia americana esta temporariamente em declínio devido à desaceleração do consumo, o fechamento das fronteiras internacionais e o encerramento temporário da produção das instalações dentro do rescaldo do ataque terrorista de 11 de setembro de 2001).

Segundo Gaonkar (*apud* Vieira e Lemos, 2009b), de modo geral, é possível conceber uma cadeia de suprimentos que seja robusta suficiente para rentabilidade contínua em face do desvio esperado e da interrupção inesperada. Entretanto, é impossível conceber uma rede de cadeia de suprimentos que seja robusta suficiente ao desastre. Entretanto, para melhor gerenciar as incertezas da cadeia de suprimentos é necessário identificar as exceções que podem ocorrer na cadeia, estimar as probabilidades destas ocorrências mapeando a cadeia de imediato e os conseqüentes atrasos dos eventos que propagam através da cadeia e quantificar seus impactos. Neste contexto, torna-se importante identificar as possíveis exceções dentro da cadeia de suprimentos e suas conseqüências antes de prosseguir para os modelos analíticos.

Ainda baseado nesses autores, a robustez da cadeia de suprimentos está relacionada com a capacidade da cadeia de manter o desempenho esperado, apesar de alguns desvios inesperados ou perturbações.

Segundo Saitou (*apud* Vieira e Lemos, 2009b), robustez é insensibilidade ao desempenho da produção, ou seja, a capacidade de manter um determinado nível de desempenho.

## 2.4 MENSURAÇÃO DO DESEMPENHO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

De acordo com Chan *et al.*(2003), desempenho da cadeia de suprimentos pode ser classificado como de natureza qualitativa e quantitativa. Mensurações de desempenho qualitativas são para aquelas medidas para as quais não existe uma relação direta numérica de medição, embora alguns aspectos delas possam ser quantificados. Alguns exemplos são a satisfação do cliente, flexibilidade (o grau com o qual a cadeia de suprimentos pode responder à variação aleatória da demanda padrão), informação e integração do fluxo de materiais (na medida em que todas as funções dentro da cadeia de suprimentos podem passar informações e matérias sem os sobressaltos do transporte), gestão eficaz do risco (todas as relações dentro da cadeia de suprimentos contém riscos inerentes - gerenciamento do risco efetivo descreve o grau para o qual o efeito desses riscos é minimizado), e desempenho do fornecedor (uma boa medida para descrever como um fornecedor pode entregar matérias-primas para produção de recursos em tempo e em boas condições).

Ainda para esses autores, o desempenho quantitativo pode ser diretamente medido numericamente. Medidas de desempenho quantitativas podem ser categorizadas por objetivos que são baseadas no custo e no lucro, medidas de resposta aos clientes, e na produtividade. Uma vez que medidas quantitativas são algo que pode ser descrito e manipuladas facilmente, qualquer medida qualitativa deve ser traduzida dentro das medidas quantitativas com a maior frequência possível. Alguns exemplos de medidas quantitativas:

- 1 Medidas baseadas em custo:
  - a. Minimização dos custos: o objetivo mais amplamente usado - o custo é tipicamente minimizado para toda a cadeia de suprimentos. Um exemplo é o custo de transporte.
  - b. Maximização das vendas e do lucro.
  - c. Minimização dos custos de inventário.
  - d. Maximização do retorno do investimento.
- 2 Medidas baseadas na receptividade do cliente
  - a. Maximização da taxa de acabados: maximiza a fração das ordens do cliente acabadas a tempo.
  - b. Minimização dos produtos atrasados.
  - c. Minimização do tempo de resposta para o cliente.

- d. Minimização do *lead time* (tempo de processamento).
  - e. Minimização da duplicação de funções: minimiza o número de funções de negócio que são supridas por mais de uma entidade de negócios.
- 3 Medidas baseadas em produtividade
- a. Maximização da capacidade de utilização.
  - b. Maximização da utilização dos recursos.

Segundo Neely (*apud* Beamon, 1999), a fim de estudar um grande número de medidas de desempenho disponíveis da cadeia de suprimentos, os pesquisadores tem se categorizados apresentando-se em poucas categorias dentro da literatura, incluindo: qualidade, tempo, flexibilidade, e custos. Esta categorização é uma ferramenta vantajosa dentro de um sistema de análise. Por exemplo, um modelo a ser desenvolvido para melhorar uma característica do sistema, por exemplo, o tempo. O modelo pode então comparar os *lead-time* de manufatura ou os dados do desempenho por uma mudança na configuração do sistema. Beamon (1999) considera que se deve dar ênfase a três tipos de mensuração de desempenho: medida de recurso (R), medidas de produção (*output*), e medidas de flexibilidade (F). Cada um desses 3 tipos tem diferentes metas, e estão descritas na Tabela 3.

**Tabela3** Metas e tipos de desempenho da cadeia de suprimentos

Tipos de mensuração de desempenho	Meta	Propósito
Recursos	Alto nível de eficiência	Gerenciamento eficiente dos recursos é crítico para a rentabilidade.
Saídas ( <i>output</i> )	Alto nível de serviços para os clientes	Sem um <i>output</i> aceitável, os clientes mudarão para outras cadeias de suprimentos.
Flexibilidade	Habilidade em responder as mudanças do ambiente	Dentro de um ambiente incerto, as cadeias de suprimentos devem ser capazes de responder as mudanças.

Fonte: segundo Beamon, (1999)

Segundo Mo *et al.* (*apud*. Vieira e Lemos, 2009b), um projeto ideal de cadeia de suprimentos teria que ter o mais baixo custo total (ou o mais alto rendimento) sob todos os possíveis cenários de demanda e *lead-time*, e por isso é “Robusto”. Entretanto, isto é geralmente inatingível, portanto, geralmente são selecionados os *tradeoffs* (entre as

alternativas existentes escolhe-se a melhor) ao escolher a mais “robusta” cadeia de suprimentos.

## 2.5 MÉTODO TAGUCHI PARA PROJETOS DE ROBUSTEZ E PROJETO EXPERIMENTAL

### 2.5.1 Entendendo o método Taguchi (*projeto robusto*)

Segundo Toledo *et al.* (2002), o método Taguchi (ou projeto robusto) pode ser entendido como uma nova abordagem da qualidade voltada para o projeto do produto e do processo.

De acordo Mo e Harrison (2005), o conceito de projeto robusto foi introduzido pela primeira vez por Genuchi Taguchi na década de 1960, e foi posteriormente aceito no domínio da concepção experimental e de controle de qualidade. A idéia básica do projeto robusto era a de fazer um processo de fabricação insensível às perturbações, chamados por Taguchi de ruídos (*noises*). O objetivo é conceber um produto ou processo robusto à variação do ruído. Uma maneira de determinar um projeto robusto é achar o conjunto de variáveis que supri o mínimo desvio dos valores alvo das respostas quando as variáveis dos ruídos são consideradas em diferentes níveis.

Para Park (1996), Taguchi desenvolveu as bases sólidas da concepção e do conceito de projeto robusto, entre eles estão:

1. Encontrando um conjunto de condições para variáveis de projeto as quais são robustas aos ruídos (perturbações).
2. Conseguir a menor variação da função de um produto a respeito do valor alvo desejado.
3. Minimizar o número de experimentos usando matrizes ortogonais e teste de confirmação.

Ainda para este autor, projeto robusto é uma metodologia de engenharia para otimizar as condições de um produto e processos, a fim de que as condições sejam sensivelmente minimizadas para as diferentes causas das variações, a qual produz produtos com alta qualidade com baixos custos de desenvolvimento e de manufatura. Taguchi extensivamente foi quem usou pela primeira vez projeto experimental como uma ferramenta para projeto de produtos os quais são mais robustos (menos sensíveis) para os fatores de ruídos (perturbações).

Para Taguchi *et al.* (2005), a abordagem para projeto robusto é realizada em três etapas:

- Sistema de projeto: seleção de um sistema para uma dada função objetivo.

- Parâmetro de projeto (*parameter design*): seleciona o nível ótimo dos parâmetros.
- Tolerância de projeto: determinação da tolerância de cada nível dos parâmetros.

Das três etapas, sistema de projeto é o mais importante, mas é difícil avaliar se o sistema selecionado é o melhor sem a avaliação dos parâmetros do projeto. Daí parâmetros de projeto é considerado por Taguchi como o núcleo da engenharia de qualidade.

Segundo Shang (1995), parâmetros de projeto identificam conjuntos que minimizam ou reduzem a variação do desempenho dentro de um processo ou produto. Ainda para este autor, parâmetros de projeto de Taguchi são muito úteis se o problema envolve fatores (parâmetros) incontroláveis, tal como tempo entre falhas de uma máquina.

Os experimentos são essências para parâmetros de projeto de Taguchi. Um projeto experimental ideal é aquele que maximiza o rendimento com um número mínimo de testes. Devido a este pensamento é que adotamos a ferramenta parâmetros de projeto de Taguchi nesta pesquisa.

Para Park (1996), as duas principais ferramentas em projeto robusto são:

- Razão sinal-ruído - SN (*signal-to-noise ration*): a qual mede qualidade com ênfase na variação.
- Matrizes ortogonais: a qual acomoda muitos parâmetros de projeto simultaneamente.

Estas ferramentas são usadas neste projeto.

### **2.5.2 Matrizes ortogonais**

Segundo Roy (2001), matrizes ortogonais foram criadas para ajudar na realização de experimentos. A menor matriz ortogonal é uma L-4 ( $2^3$ ). A designação pela notação L é devido ao *latin squares*. Uma matriz L-4 possui 4 linhas (experimentos) e 3 colunas (fatores), uma matriz L-8 possui 8 linhas e 7 colunas e uma matriz L-n possui n linhas. Para Park (1996), as matrizes ortogonais de dois níveis mais freqüentes são L-4, L-8, L-16 e L-32.

Para Shang (1995), cada linha (fila) de uma matriz ortogonal representa a combinação de níveis de fatores para serem “rodados” dentro de um experimento.

A matriz que atribui fatores controláveis é chamada de matriz interna (*inner array*) e a matriz que atribui fatores incontroláveis é chamada de matriz externa (*outer array*).

Cada coluna é balanceada com ela mesma e com as outras colunas, note que na L-4, Tabela 4, a primeira coluna possui dois números “1” e dois números “2”, onde estes números significam os níveis dos parâmetros, primeiro e segundo nível respectivamente.

Taguchi desenvolveu as matrizes ortogonais para reduzir o número de experimentos e para aumentar a precisão. Usar-se-á matrizes ortogonais para examinar os fatores controláveis e incontroláveis.

**Tabela 4** A menor matriz – L-4  
L-4 ( $2^3$ )

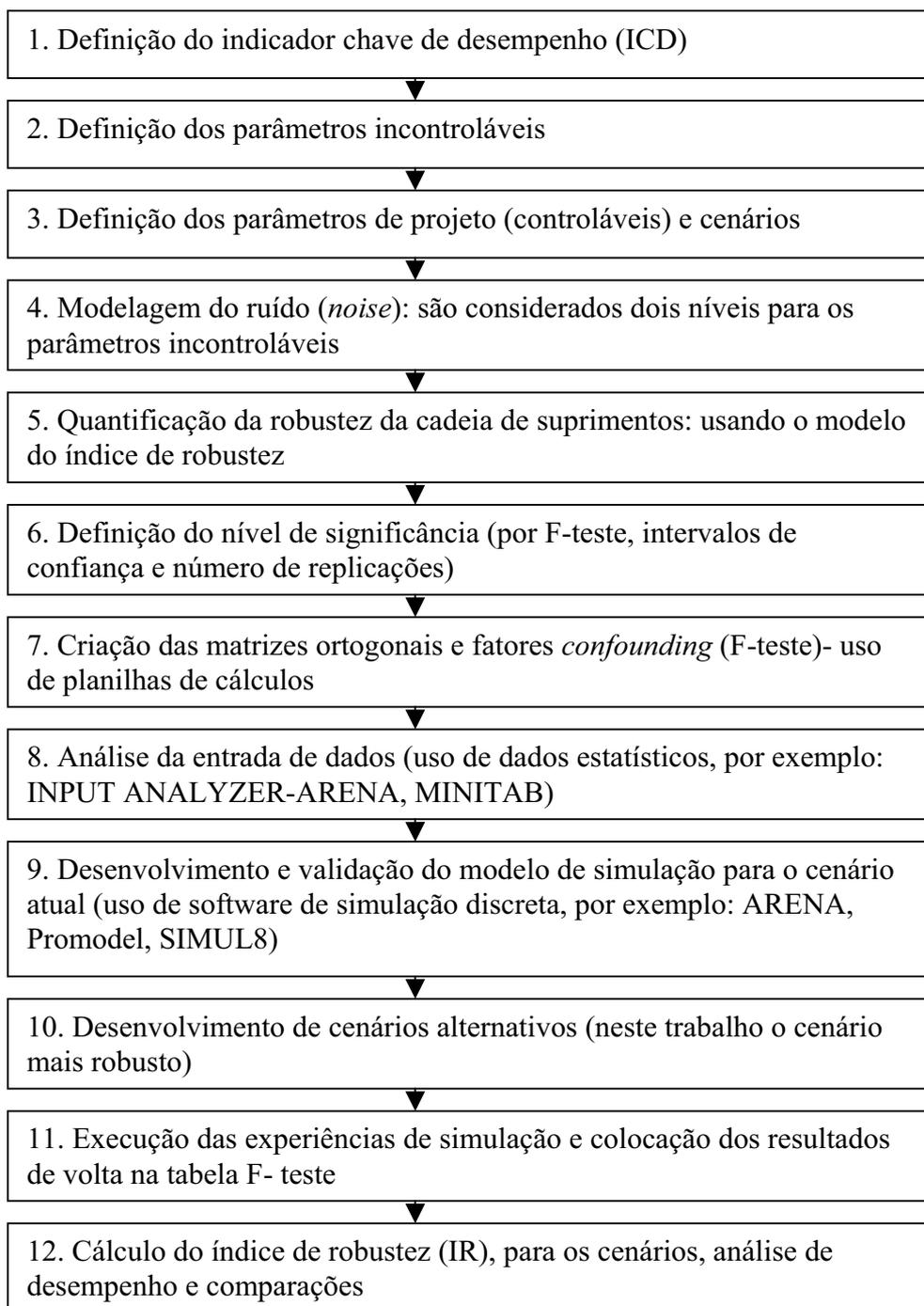
Experimento	Fator			Resultado
	A	B	C	
1	1	1	1	3
2	1	2	2	6
3	2	1	2	4
4	2	2	1	2

### 2.5.3 Revisão da Metodologia para a Estimativa da Robustez da Cadeia de Suprimentos

Esta nova abordagem para a estimativa da robustez foi sugerida por Vieira *et al* (2009).

A abordagem proposta para estimativa do sistema de robustez, é baseada no uso de diversas ferramentas, a saber: parâmetros de projeto robusto de Taguchi; matrizes ortogonais; uma nova fórmula do índice de robustez (IR); simulação discreta e intenso uso de planilhas de cálculos (planilhas no software Excel).

A metodologia segue doze passos básicos e não são estritamente seqüenciais, estão esboçados na Figura 5, a seguir:



**Figura 5** Passos da metodologia para a estimativa da robustez da cadeia de suprimentos

Fonte: Vieira e Lemos (2009b)

### 2.5.3.1 Definição do Indicador Chave de Desempenho

O indicador chave de desempenho é à medida que define o desempenho do sistema sob análise e está relacionado com o custo do processo.

### 2.5.3.2 Definição dos parâmetros incontroláveis

Baseado em Park (1996), parâmetros não-controláveis ou indesejáveis, são aqueles que causam desvio dos valores alvos das características funcionais dos produtos, ou processos e são chamados por ele de *noises* (ruídos ou perturbações).

Segundo Vieira e Lemos (2009), os parâmetros não-controláveis de uma cadeia de suprimentos podem ser: tempos de transportes, tempos médio entre falhas e reparos, variação de demanda esperada, tempos de processamento e tempos de *setup* (tempos de mudança entre processos).

### 2.5.3.3 Definição dos parâmetros de projeto (controláveis) e cenários,

Baseado em Park (1996), parâmetros controláveis de projeto, são os parâmetros tecnicamente controláveis, isto é, parâmetros de projeto, que podem ser reproduzidos, retestados ou alterados.

O objetivo da definição destes parâmetros é o de construir um sistema de triagem mais robusto, isto é, menos sensível aos ruídos (*noises*) ou perturbações, nos parâmetros não-controláveis.

Segundo Vieira *et al* (2009), parâmetros de projeto são aqueles configurados pelo tomador de decisão, como parâmetros de controle de produção (como ordens de produção com quantidades econômicas, número de períodos a serem utilizados como previsão de dados históricos, nível de ponto de re-ordens) e parâmetros logísticos, como o número de caminhões na frota de distribuição.

### 2.5.3.4 Modelagem do ruído (*noise*): dois níveis de fatores incontroláveis são considerados

Segundo Vieira e Lemos (2009b), as variáveis não-controláveis (incontroláveis) são as razões para o projeto da cadeia de suprimentos robusta, portanto, o efeito do ruído deve ser considerado em cada parâmetro não-controlável.

### 2.5.3.5 Quantificação da robustez da cadeia de suprimentos: índice de robustez

Devem-se considerar a importância de cada um dos parâmetros não-controláveis na cadeia de suprimentos, e a importância dos pesos para cada parâmetro usado na mensuração da robustez da cadeia de suprimentos.

A robustez pode ser estimada como uma combinação de cada parâmetro não-controlável significado de robustez, de acordo com a sua importância para o desempenho da cadeia de suprimentos, sendo assim o índice da robustez para a cadeia de suprimentos para quantificar a robustez da cadeia de suprimentos é baseado na eficiência da cadeia de suprimentos, sendo matematicamente expresso usando a equação (2.1), Vieira *et al.* (2009).

$$\text{Índice de robustez} = W_1 \cdot R_1 + W_2 \cdot R_2 + W_{13} \cdot R_{13} + \dots + W_n \cdot R_n \quad (2.1)$$

da cadeia de suprimentos

Onde:

$R_i$  : é o índice de robustez de um único fator.

n: número de parâmetros não controláveis da cadeia de suprimentos.

$W_i$  : importância percentual do fator i

$R_i$  : {1, se o parâmetro i não afeta significativamente a eficiência da cadeia de suprimentos dentro de um dado nível de significância ( $\alpha$ )}.

$R_i$  : {0, se o parâmetro i afeta significativamente a eficiência da cadeia de suprimentos dentro de um determinado nível de significância ( $\alpha$ )}.

Sendo assim o índice de robustez varia de 0 (cadeia de suprimentos absolutamente não robusta) para 1 (totalmente robusta).

Vieira *et al.* (2009), adota que o índice da cadeia de suprimentos maior ou igual a 70%, indica que a cadeia de suprimentos é razoavelmente robusta. Para o índice maior que 90% implica que a cadeia de suprimentos é muito robusta, e para um  $R_i$  abaixo de 70% a cadeia de suprimentos não é robusta.

### 2.5.3.6 Definição do nível de significância (por F-teste, intervalo de confiança e números de replicações)

Vieira *et al.* (2009), relata que geralmente adota-se 90% ou 95% para ter uma confiança aceitável nos resultados, e que para esta nova metodologia será usado o nível de

95% de confiança. A simulação considerará 35 replicações. A análise será baseada na média dessas 35 eficiências. O total das replicações depende do problema que está sendo analisado.

### 2.5.3.7 Criação das matrizes ortogonais e fatores *confounding* (F-teste)

De acordo com ROY (2001), não há uma fórmula para escolher que tipo de matriz ortogonal será usada em um trabalho, se de dois, três ou quatro níveis e que tipo de matriz, neste trabalho será usado uma matriz de dois níveis por pura conveniência do autor.

Segundo Park. (1996), as regras básicas para usar uma matriz ortogonal de dois níveis em Parâmetros de projeto robusto de Taguchi são as seguintes:

1. Um dos fatores que podem ser arbitrariamente alocados em uma coluna.
2. Para as marcas básicas, deixem  $a^2 = b^2 = c^2 = \dots = 1$ .
3. Cada coluna tem um grau de liberdade, e um fator ou interação atribuído a uma única coluna. As colunas para qual nenhum fator ou interação são atribuídas, são colunas de erros.
4. Suponha que tem um fator A tem uma marca básica x e fator B tem marca básica y. Se alguém quiser atribuir interação AB, deve-se atribuir a ela a coluna cuja base é marca xy, Por exemplo, se uma marca é na base ab, e B está em ac, então AB devem ser atribuídas na marca básica  $(ab) * (ac) = a^2bc = bc$ .
5. A soma dos quadrados de um fator ou interação é obtida pela soma dos quadrados da coluna na qual o elemento ou a interação é alocado. A coluna soma de quadrados é calculado como:  $\text{coluna soma de quadrados} = (T_1 - T_{-1})^2 / (\text{número total de experimentos})$   
Onde:  $T_i$  significa a soma dos dados para o enésimo nível da coluna.
6. A soma dos quadrados dos erros é a soma das somas dos quadrados das colunas dos erros.

### 2.5.3.8 Análise da entrada dos dados

Segundo Vieira *et al.* (2009), a entrada de dados é analisada para descobrir a melhor probabilidade de distribuição para ser usada nos modelos de simulação. O projetista deve utilizar um software estatístico para estimar a melhor distribuição para cada tipo de entrada de dados.

### 2.5.3.9 Desenvolvimento e validação do modelo de simulação do cenário atual

Para Vieira e Lemos (2009b), devido ao caráter aleatório dos problemas da cadeia de suprimentos, tanto para a manufatura ou serviços, a utilização de um software para simulação é quase que obrigatório. A utilização de modelos puramente matemáticos certamente vai exigir simplificações, que não pode ser aceitável em algumas situações. Por este motivo, a utilização de um pacote de softwares de simulação como ARENA, ProModel, ou SIMUL8, por exemplo, é uma solução atraente para a análise de desempenho (e robustez).

#### 2.5.3.10 Desenvolvimento de cenários alternativos (neste trabalho o cenário mais robusto)

Segundo Vieira *et al.* (2009), normalmente os modelos de simulação para cenários alternativos são muito similares aos modelos de simulação atual. Devido a essa similaridade entre os modelos, o software ARENA atenderá as expectativas.

#### 2.5.3.11 Execução das experiências de simulação e colocação dos resultados nas tabelas F-testes

Na presente fase, o projetista executa todos os experimentos, obtém os resultados e o desempenho na tabela F-testes, estimando a robustez para cada cenário e descobrirá qual será o melhor cenário para lidar com eventos futuros que possam ocorrer. A fim de estimar o índice robustez, há que definir a importância (peso) de cada parâmetro não-controlável para a robustez do sistema.

#### 2.5.3.12 Cálculo da Robustez (IR) para todos os cenários, análise de desempenho final e comparações

Após o projetista executar todos os experimentos obtendo os resultados e o desempenho na tabela de F-testes e a definição dos pesos de cada parâmetro, o próximo passo será o cálculo do  $F_0$ , para cada parâmetro e compará-lo com o F tabelado, se o  $F_0$  é maior que o F tabelado, o parâmetro será considerado significativo, ou seja, não é considerado robusto e em caso contrário será considerado robusto.

A seguir, calcula-se a variação da robustez para cada parâmetro, atribuindo-se o valor “0” para o não robusto e “1” para o parâmetro considerado robusto.

Na seqüência obtém-se a importância dos pesos em percentual, ou seja, dividindo-se o valor atribuído para cada peso dos parâmetros pela soma destes, obtendo-se assim a importância dos pesos em percentual.

A próxima operação é a multiplicação da variação da robustez pela importância do peso em percentual, tendo como resultado a robustez para cada parâmetro, ou seja, se a variação para a robustez foi “1” e a importância do peso em percentual foi 50% a robustez do parâmetro será  $= 1 \times 0,5 = 0,5$ .

O índice de robustez geral será a soma de cada índice de cada parâmetro. O procedimento descrito acima será realizado para todos os cenários analisados em busca do cenário mais robusto (do maior índice em valor absoluto).

Para a análise do desempenho final e as comparações, usa-se a análise do erro conjugada com o índice de robustez para a obtenção do cenário mais robusto.

#### **2.5.4 Razão sinal-ruído (*signal-to-noise-ratio* ou razão SN)**

Taguchi dividiu as variáveis em duas categorias: fatores de projeto e fatores de ruídos. Fatores de projeto são as decisões controláveis que afetam o projeto enquanto que fatores de ruídos são aquelas variáveis que representam as forças de variação.

Segundo Taguchi *et al.* (2005), a razão sinal-ruído é um método de mensuração que tem sido usado durante há quase um século pela indústria da comunicação. Uma rádio mensura o sinal da onda da voz transmitida pela estação de rádio e convertida em onda de som. Taguchi generalizou este conceito, e aplicou na avaliação de mensuração de sistemas.

Ainda de acordo com estes autores, o método SN deve ser usado para permitir a maximização da robustez de um processo, simplesmente selecionando os níveis de fatores de controle que dão a maior resultado da relação de SN. O SN é definido como a relação entre os valores desejados e indesejados de saída do projeto, ou seja, para se ter um valor maximizado de SN deve-se ter um valor maximizado dos valores desejados e uma minimização dos valores indesejados.

Há diversos tipos de razão de sinais dependendo do tipo de características. A unidade do SN é dada por decibéis (dB). SN pode ser dividida em três categorias, pelas equações a seguir:

Característica quanto menor melhor (*smaller the better*): para Taguchi *et al.* (2005), esta característica será usada para minimizar os valores de saída e não há dados negativos (neste caso o valor alvo é zero).

$$SN = -10 \log \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n yi^2 \right) \quad (2.2)$$

Onde  $y_i$ , são os dados de saída (resultantes dos experimentos) e  $n$ , o número de observações.

Característica quanto maior melhor (*larger-the-better*): Para Taguchi *et al.* (2005), esta característica será usada quando a intenção é maximizar os dados de saída e não há dados negativos. Para esta característica o valor alvo é infinito.

$$SN = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{yi^2} \right) \quad (2.3)$$

Onde  $y_i$ , são os dados de saída (resultantes dos experimentos).

Característica nominal (*nominal the better*): ainda para estes autores, esta característica será usada quando o objetivo desejável da característica,  $y$ , ser o mais próximo possível do valor alvo.

$$SN = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (yi - m)^2 \right) \quad (2.4)$$

Onde:  $y_i$  são os dados de saída (resultantes dos experimentos),  $n$  é o número de observações e  $m$  o valor alvo.

Segundo, Taguchi *et al.* (2005) e Roy (2001), os benefícios são os seguintes:

- Realização de um eficiente projeto robusto;
- Eficiente ajuste da calibração de um projeto;
- Redução de um ciclo de desenvolvimento de um processo/produto;
- Eficiente avaliação da medição de um sistema;
- Pesquisa eficiente para um grupo de produtos: Tecnologia de desenvolvimento robusto;
- Quando os resultados são analisados usando o SN, a previsão de um desempenho ótimo é mais provável de ser verdade;
- O uso de uma única medição, na qual incorpora os efeitos das mudanças dentro da média, bem como, da variação (desvio padrão) em igual prioridade.

Para Park, (1996), a abordagem estatística para projeto experimental é necessária quando se pretende tirar conclusões significativas dos dados. Há dois aspectos para qualquer projeto experimental: o projeto da experiência e o da análise estatística de coleta de dados.

De acordo com NIST (*apud* Vieira e Lemos 2009b) existem cinco tipos diferentes de projetos os quais diferem de acordo com o objetivo experimental da seguinte forma:

1. Objetivo comparativo: se você tem um ou diversos fatores sob investigação, mas o principal objetivo de sua experiência é o de fazer uma conclusão sobre um importante fator a priori, a questão de interesse é se ou não que o fator é “significante”, nestas condições ter-se-á um problema comparativo e você precisa de uma solução de projeto comparativo.

2. Objetivo triado: o principal objetivo do experimento é o de selecionar ou triar para fora os mais importantes efeitos dos menos importantes. Esses projetos de triagem também são denominados de projetos dos principais efeitos.

3. Objetivo (método) superfícies de respostas: O experimento foi desenvolvido para permitir uma estimativa para a interação entre fatores incluindo até mesmo efeitos quadráticos e desenvolvimento da forma local da resposta superficial. Por esta razão, eles são denominados de método/ projeto de superfície de respostas (*response surface method-RSM*). O método de superfície de resposta é usado para:

- a Achar/melhorar ou otimizar as configurações do projeto.
- b Diagnosticar problemas de processo e pontos fracos.
- c Fazer um produto ou processo mais robusto contra as influencias externas não controláveis. “Robusto” significa insensibilidade relativa para essas influencias.

4. Otimizando resposta quando fatores são proporções de uma mistura de um objetivo: Se você tem fatores que são uma mistura proporções e você quer conhecer qual é a “melhor” proporção de fatores de modo a maximizar (ou minimizar) a resposta, então você precisa de um projeto de mistura.

5 Ótima montagem de um objetivo do modelo de regressão: Se você quer para um modelo uma resposta como uma função matemática (quer seja conhecida ou empírica) de uns poucos fatores contínuos e você deseja “bom” modelo para estimativa de parâmetros, então você precisa de um projeto de regressão.

Ainda segundo este autor, o termo: projeto de seleção, refere-se a um projeto experimental que visa encontrar alguns fatores importantes a partir de uma lista de muitos potenciais existentes. Alternativamente, pode se referir a um projeto de seleção (ou triagem) se o seu principal objetivo consiste em identificar os principais efeitos significativos, em vez

de interação de efeitos, sendo que este último assumiu uma grandeza menos importante. A tabela 5 mostra as diretrizes para a seleção de projeto para diferentes números de fatores e três tipos de objetivos (comparativo, seleção e superfície de resposta). O objetivo básico do projeto de fatores fracionados (*fractional factorial design*) é economicamente de investigar o relacionamento entre as causas e efeitos de uma dada configuração experimental. Por exemplo, um experimento pode ser projetado para determinar como melhor fazer um produto melhor ou um processo mais robusto contra a influência externa dos fatores não-controláveis.

Park, (1996), também menciona que projeto de fatores fracionados que usa matrizes ortogonais são frequentemente usados a fim de selecionar os importantes fatores que impactam no desempenho do produto (ou processo).

**Tabela 5** Diretriz para a seleção de projeto

Número de fatores	Objetivo comparativo	Seleção de objetivos	Objetivo Superfície de resposta
1	1-fator de projeto completamente aleatório	-	-
2-4	Bloco de projeto aleatório	Fatores fracionados ou inteiros	Central composta ou Box-Behnken
5 ou mais	Bloco de projeto aleatório	Fatores fracionados ou Plackett-Burman	Primeira seleção para redução do número de fatores

Fonte: NIST (*apud* Vieira *et al.* 2009)

## 2.6 MÉTODO SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Segundo Montgomery (2001), a metodologia superfície de resposta, é uma coleção de técnicas estatísticas e matemáticas que são úteis para a análise e modelagem de problemas na qual a resposta desejada é influenciada por diversas variáveis e o objetivo é otimizar esta resposta.

Para Werkema e Aguiar (1996), a metodologia superfície de resposta tem como objetivo determinar qual é a condição de operação do processo que levará à obtenção de um valor ótimo para a variável resposta. Neste artigo, usar-se-á superfície de resposta para refinar

os valores obtidos dos fatores controláveis determinados pelo método TAGUCHI, tendo como meta a maximização dos valores de saída dos fatores controláveis.

Ainda segundo Werkema e Aguiar, a visão geral das etapas para a determinação da condição ótima de operação de um processo, por meio do método de superfície de resposta é expressa em cinco passos:

- 1 Relacionar os fatores que possam exercer efeitos significativos sobre a variável resposta de interesse;
- 2 Planejar um experimento que permita a identificação dos fatores influentes dentre aqueles relacionados no item 1. Nesta etapa geralmente são utilizados experimentos  $2^k$ .
- 3 Eliminar os fatores detectados como não influentes na etapa anterior e avaliar a necessidade de inclusão de novos fatores no estudo.
- 4 Realizar um experimento mais detalhado, envolvendo apenas os fatores que exercem efeitos significativos sobre a variável resposta. Nesta etapa o objetivo é ajustar um modelo que possa representar o relacionamento existente entre os fatores influentes e a resposta. Geralmente, este experimento é realizado em uma pequena região centrada na condição atual de operação do processo. Normalmente um modelo de primeira ordem.
- 5 A partir do modelo ajustado no item 4, realizar a análise que permitirá a determinação da condição ótima de operação do processo.
  - O modelo de primeira ordem do item 4 será o ponto de partida para o andamento seqüencial, de forma rápida e eficiente, para a proximidade do ótimo.
  - Em etapas subseqüentes da análise, quando as vizinhas do ótimo já tiverem sido alcançadas, será necessário ajustar o modelo em ordem mais elevada, pois nestas regiões a curvatura presente na superfície de resposta será mais acentuada.A interpretação deste modelo permitirá que a condição ótima de operação do processo possa ser alcançada.

### **2.6.1 Método da máxima inclinação ascendente/descendente**

Segundo Werkema e Aguiar (1996), cinco são as etapas para a realização do método:

- 1 Realizar um experimento com o objetivo de ajustar um modelo de primeira ordem em uma pequena região de interesse definida pelas variáveis  $w_1, w_2, \dots, w_k$ .

Geralmente esta região engloba a condição usual de operação do processo, que geralmente está longe do ótimo. Nesta região é comum que a superfície de resposta apresente uma leve curvatura, sendo então ajustado um modelo de primeira ordem, que é dado pela equação (2.5):

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i w_i \quad (2.5)$$

Para esta superfície, as curvas de nível são umas séries de retas paralelas

- 2 Utilizar a informação obtida na etapa 1 para determinar a direção de máxima inclinação ascendente/ descendente.
  - A direção de máxima inclinação ascendente/descendente é a direção na qual  $\hat{y}$  aumenta/diminui mais rapidamente. Esta direção é perpendicular às curvas de nível e é tomada a partir do centro da região na qual foi ajustado o modelo da etapa anterior.
- 3 Conduzir uma série de experimentos ao longo da direção de máxima inclinação ascendente/descendente até que seja encontrada uma região onde não é observado nenhum aumento/decréscimo na variável resposta.
  - Escolher o valor da alteração que será sofrida por um dos fatores  $w_1, w_2, \dots, w_k$ , a partir do centro do intervalo de variação deste fator.
  - O fator considerado ( $w_i$ ) deverá ser aquele cujo efeito sobre a variável resposta é mais conhecido pelo responsável pela condução do estudo e/ou aquele que possui o coeficiente de regressão de maior valor absoluto.

- A magnitude da alteração que será sofrida por este fator ( $w_1$ ), deve ser tal que não implique em um afastamento muito grande da região onde foi ajustado o modelo e ao mesmo tempo deve provocar variação significativa na variável resposta.
- O sinal de  $\Delta w_i$  deve ser escolhido de acordo com o seguinte critério:

a- Se o ponto ótimo é um máximo,  $\Delta w_i$  tem o mesmo sinal de  $\hat{\beta}_i$

b- Se o ponto ótimo é um mínimo,  $\Delta w_i$  tem o sinal oposto ao de  $\hat{\beta}_i$

- $\Delta x_i = (\Delta w_i) / A_i / 2,$  (2.6)

Onde

$A_i$  = amplitude do intervalo de variação do fator considerado

- O valor da alteração para  $\Delta x_j$ , sob forma codificada, será:

$$\Delta x_j = \frac{\hat{\beta}_j}{\hat{\beta}_i} \Delta x_i \text{ sendo } j \neq i \text{ de } i \quad (2.7)$$

$$\hat{\beta}_i \Delta x_i$$

Segundo Montgomery (2001) e Werkema e Aguiar (1996), para simplificar os cálculos e manter a mesma notação utilizada em experimentos fatoriais  $2^k$ , os fatores,  $w_1, w_2$  foram codificados de forma que o intervalo de variação de cada um deles se transformasse no intervalo (-1, 1). Os fatores em forma codificada representados por  $x_1$  e  $x_2$ , foram definidos da seguinte forma:

$$x_i = \frac{w_i - (\text{nível alto do fator} + \text{nível baixo do fator})/2}{(\text{nível alto do fator} - \text{nível baixo do fator})/2} \quad (2.8)$$

Uma outra maneira de mostrar esta codificação é apresentada por Shang (1995) e Shang *et al.* (2001):

$$x_i = (\text{o enésimo valor natural} - \text{valor presente}) / (\text{metade da variação da variável}) \quad (2.9)$$

Para Shang (1995), Shang *et al.*(2004), o caminho da máxima inclinação ascendente, na qual o y muda mais rapidamente, é determinado pelo maior coeficiente de regressão em valor absoluto no modelo de primeira ordem, ou seja :

$$\Delta x_i = \hat{\beta}_i / \hat{\beta}_j, \quad (2.10)$$

Onde

$\hat{\beta}_i$  = coeficientes dos k fatores,  $i= 1, 2, \dots, k$

$\hat{\beta}_j$  = maior coeficiente da regressão em valor absoluto.

Ainda para estes autores, a conversão das variáveis,  $\Delta x_i$ , em variáveis naturais  $\Delta S_i$ , é feito multiplicando  $\Delta x_i$  pelo tamanho do passo atual  $S_i$ , ou seja:

$$\Delta S_i = \Delta x_i * S_i, \text{ o tamanho do passo é determinado pelo conhecimento que os projetistas possuem sobre o processo} \quad (2.11)$$

Repetir as etapas 1,2 e 3 a partir da nova região determinada na etapa 3.

- Esta repetição deve ser realizada enquanto não for detectada falta de ajuste do modelo de primeira ordem.

4 Quando for detectada falta de ajuste do modelo de primeira ordem, realizar experimentos adicionais para obter uma estimacão mais precisa da condicão ótima de operacão do processo.

- Esta estimacão na maioria das vezes envolverá o ajuste de modelo de segunda ordem.
- A necessidade do ajuste de um modelo de segunda ordem geralmente é a indicacão de que as vizinhanças do ótimo foram alcançadas.

A equaçãõ que representa um modelo de segunda ordem, expressa em termos de variáveis codificadas  $x_i$ ,  $i= 1,2,\dots,k$ , é a seguinte, Segundo Werkema e Aguiar (1996):

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \hat{\beta}_{ij} x_i x_j \quad (2.12)$$

Segundo Shang (1995) e Shang *et al.* (2004), o planejamento central composto é amplamente utilizado para o ajuste do modelo de segunda ordem, este planejamento consiste no mesmo planejamento fatorial executado anteriormente aumentado de n pontos axiais, onde n é igual 2 x o número das variáveis independentes, que terá a seguinte notaçãõ:(+/- $\alpha$ , 0,0,..,0), (0,+/- $\alpha$ ,0,0,....,0), (0, 0, +/- $\alpha$ ), onde:

$$\alpha = (\text{n}^\circ \text{ de tratamentos})^{1/4} \quad (2.13)$$

por exemplo, para  $k=2$  (dois fatores-  $x_1$  e  $x_2$ ), em experimentos fatoriais  $2^k$ , teremos  $2^2 = 4$  tratamentos e  $\alpha = (2^2)^{1/4} = 1,414$ .

Ainda segundo estes autores, o modelo de segunda ordem é geralmente usado para melhorar a otimização do processo quando o modelo de primeira ordem não se ajusta mais.

Após a construção do experimento, realizar a análise da variância para a avaliação da significância da regressão e incorporando o teste da falta de ajuste.

Segundo Montgomery (2001), para facilitar os cálculos pode-se reduzir um modelo de segunda ordem em um modelo linear, por exemplo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2, \text{ modelo de segunda ordem para 2 variáveis} \quad (2.14)$$

Pode-se dizer que  $x_3 = x_1^2$ ,  $x_4 = x_2^2$ ,  $x_5 = x_1 x_2$ , e  $\beta_3 = \beta_{11}$ ,  $\beta_4 = \beta_{22}$  e  $\beta_5 = \beta_{12}$  então o modelo de segunda ordem tornou-se um modelo linear:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \varepsilon \quad (2.15)$$

Por analogia, o modelo de segunda ordem para 3 variáveis,  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , será o seguinte:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 \quad (2.16)$$

E se,  $x_4 = x_1^2$ ,  $x_5 = x_2^2$ ,  $x_6 = x_3^2$ ,  $x_7 = x_1 x_2$ ,  $x_8 = x_1 x_3$ ,  $x_9 = x_2 x_3$ , e  $\beta_4 = \beta_{11}$ ,  $\beta_5 = \beta_{22}$ ,  $\beta_6 = \beta_{33}$ ,  $\beta_7 = \beta_{12}$ ,  $\beta_8 = \beta_{13}$ ,  $\beta_9 = \beta_{23}$ , o modelo de segunda ordem tornou-se um modelo de primeira ordem, apenas para facilitar os cálculos:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_6 x_6 + \beta_7 x_7 + \beta_8 x_8 + \beta_9 x_9 \quad (2.17)$$

Uma outra opção para efetuar os cálculos é usar o software MINITAB.

Sendo o modelo de segunda ordem adequado e a regressão significativa, deve-se passar para a próxima etapa do método que é a análise canônica.

Segundo Werkema e Aguiar (1996), durante o ajuste de um modelo de segunda ordem, o primeiro passo consiste em determinar qual é a forma da superfície correspondente. Um procedimento que permite a identificação do tipo de superfície e da condução ótima de operação do processo é conhecido como análise canônica, cujas etapas são as seguintes:

- Escrever o modelo de segunda ordem sob forma matricial:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \mathbf{x}'\mathbf{b} + \mathbf{x}'\mathbf{B}\mathbf{x} \quad (2.18)$$

Onde:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_k \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{12/2} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \hat{\beta}_{1k/2} \\ \hat{\beta}_{12/2} & \hat{\beta}_{22,} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \hat{\beta}_{2k/2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & \cdot & & \cdot \\ \hat{\beta}_{1k/2} & \hat{\beta}_{2k/2} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \hat{\beta}_{kk} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

- Calcular o ponto estacionário, segundo Shang *et al.* (2004), ponto estacionário é o conjunto de  $\mathbf{x}_i$ , que otimizam a superfície de resposta e onde as derivadas parciais são iguais à zero.

$$\delta \hat{y} / \delta \mathbf{x} = \mathbf{b} + 2\mathbf{B}\mathbf{x} = 0$$

$$\text{Esta solução é } \mathbf{x}_0 = \frac{-1}{2} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{b} \quad (2.20)$$

- Calcular a resposta predita no ponto estacionário

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \frac{1}{2} \mathbf{x}_0' \mathbf{b} \quad (2.21)$$

- Calcular os autovalores  $\lambda_i$ ,  $i=1, 2, \dots, \kappa$ , da matriz  $\mathbf{B}$ .
- Escrever o modelo de segunda ordem ajustado aos dados experimentais sob a forma canônica.

$$\hat{y} = \hat{y}_0 + \lambda_1 v_1^2 + \lambda_2 v_2^2 + \dots + \lambda_k v_k^2$$

- Caracterizar a natureza da superfície de resposta.
  - Se todos os  $\lambda_i$ 's são positivos, então o ponto estacionário  $\mathbf{x}_0$  é um ponto de mínimo.
  - Se todos os  $\lambda_i$ 's são negativos, então o ponto estacionário  $\mathbf{x}_0$  é um ponto de máximo.
  - Se todos os  $\lambda_i$ 's não tem o mesmo sinal, então o ponto estacionário  $\mathbf{x}_0$  é um ponto de sela.
  - Se um ou alguns dos  $\lambda_i$ 's são próximos de zero ou muito pequenos em relação aos demais e o ponto estacionário  $\mathbf{x}_0$  está dentro da região de

experimentação para o ajuste do modelo de segunda ordem, então a superfície de resposta é uma cumieira estacionária.

- Se um ou alguns dos  $\lambda_i$ 's são próximos de zero ou muito pequenos em relação aos demais e o ponto estacionário  $\mathbf{x}_0$  está fora da região de experimentação para o ajuste do modelo de segunda ordem, então a superfície de resposta é uma cumieira crescente ou decrescente.

Para consolidar os conhecimentos apresentados sobre a metodologia superfície de resposta será apresentado no APÊNDICE A, deste trabalho, um exemplo adaptado de (Werkema e Aguiar 1996):

## 2.7 FUNDAMENTOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Para Hollocks, (1992), simulação é uma técnica de pesquisa operacional que envolve a criação de um programa representando alguma parte do mundo real, de forma que experimentos no modelo são uma antevisão do que acontecerá na realidade.

Chan e Chan, (2005), descrevem uma modelagem através da simulação computacional, realizando uma avaliação comparativa das estratégias de gerenciamento da cadeia de suprimentos, retirando através destas as vantagens competitivas em diferentes tipos de indústrias. Os autores desenvolveram cinco modelos e a partir deles simularam as diversas situações com o objetivo claro de desvendar qual seria o desempenho ótimo para uma cadeia de suprimentos.

Segundo Banks e Carsen (1984), Pedgen *et al.* (1990), Prado (2004) e Law e Kelton (2000), para se fazer uma simulação é necessário seguir alguns passos, ou uma “metodologia” própria. Esta metodologia é detalhada a seguir:

1. **Formulação e análise do problema:** Segundo Prado (2004), esta etapa é certamente, crítica, pelo fato de que ao iniciar a formulação de um trabalho deve-se saber exatamente o que queremos produzir.
2. **Planejamento do projeto:** Definição dos recursos a serem utilizados, como por exemplo, software utilizado, definição do nível de confiança, definição do tamanho (duração do período) de análise.

Se a simulação será contínua ou discreta. Contínua para modelos representados por equações diferenciais, usada para processos de fluxo contínuo.

Discreta usada para simulação dirigida por eventos, representadas por funções probabilísticas, tem um início e um fim.

Para esta pesquisa, usar-se-á a simulação discreta, devido ao processo em estudo ser dirigido por eventos.

3. **Formulação do modelo conceitual:** Desenvolvimento de um modelo preliminar para a definição dos componentes, variáveis descritas, interações e lógicas do sistema.
  
4. **Coleta de dados e informações:** Consiste em coletar os dados no sistema atual e coletar os procedimentos da operação.  
Identificação dos fluxos do sistema, suas distâncias e durações;  
Coletar a produção e produtividade do cenário atual;  
Coletar os indicadores de desempenho.  
Esta etapa também serve para coletar os dados das anomalias, como por exemplo: perdas, congestionamentos e dificuldades de manuseio, existentes no cenário atual.  
Segundo Law e Kelton (2000), não devemos coletar as informações de uma única pessoa, pois esta pessoa pode ter as informações incorretas, para termos certeza das informações colhidas devemos saber identificar os *experts* no assunto.
  
5. **Construção do modelo:** O objetivo desta etapa é de validar as propostas, mostrar como o sistema irá funcionar. Ao final desta etapa deve-se conseguir a aprovação do cliente/usuário antes de se partir para a próxima etapa.
  
6. **Verificação e validação:** Após o levantamento dos dados, procura-se validar a coerência da meta e do escopo, ou seja, se o trabalho é possível de ser realizado.  
Serve para comparar o sistema atual com o modelo, ou seja, desempenhos mensurados com os do sistema existente.

7. Projeto do experimento: É a fase para especificar a seqüência para configuração de interesse do sistema.
  - Duração de cada evento;
  - Número de simulações independentes;
  - Intervalo de confiança.
8. Executar o experimento e analisar os resultados: É a execução da simulação para gerar os dados necessários produzindo inferências a partir dos dados produzidos pela simulação.
9. Refinar o projeto do experimento: Antes de se simular o cenário da situação futura, deve-se simular a situação total, como forma de compreender corretamente o cenário existente e para ter certeza de que a situação futura está assentada em base sólida.
10. Análise final dos resultados e documentação do processo: Uma vez que os resultados apresentados foram aceitos, deve-se produzir a versão definitiva da documentação do trabalho.

Nesta fase recomenda-se o uso da animação para os gerentes e as pessoas que não estão familiarizadas com todos os detalhes do modelo.

Segundo Prado (2004), O material a ser produzido é composto de:

  - Manual “guia do usuário”;
  - Manual “Descrição do Modelo”;
  - Manuais “Resultados dos testes efetuados”;
  - Descrição do “Relatório personalizado”, de resultados obtidos na simulação;
  - Relatório final.

## 2.8 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA AOS CORREIOS

Segundo Bard, *et al.* (1991a), os programas de automatização visam minimizar o crescimento nos custos de mão-de-obra. Os resultados da simulação são apresentados para propor um projeto que personifica uma variedade de novos conceitos e equipamentos, incluindo arranjar o seqüenciamento de rotas de transporte.

Bard, *et al.* (1997b), cita em seu artigo que o *Canada Post Corporation* (CPC), correios do Canadá, selecionou e avaliou um pacote comercial (software) de simulação para

ser usado na operação e no planejamento a longo-prazo. O projeto consistiu em três fases distintas:

1. Investigar as aplicações potenciais de aplicações no ambiente do CPC.
2. Comparar com o software existente e fazer uma recomendação
3. Desenvolver um modelo completo da facilidade para servir para as 22 plantas mecanizadas de processamento de correios ao longo do Canadá.

Wang, *et al.* (2005), apresentam um estudo sobre o seqüenciamento de processamento da importação de correios (cartas e/ou encomendas que entram em um centro de processamento e distribuição). O correio vem de diversas origens e vão para diversos destinos, sendo que para cada destino existem caminhões programados com capacidades limitadas. O objetivo do artigo é o de determinar a seqüência na qual a importação de correio deve ser processada de modo que a capacidade dos caminhões seja minimizada. Experimentos de simulação são realizados para testar a eficiência destes métodos.

Ainda segundo estes autores, o evento de simulação discreta foi utilizado como uma ferramenta para avaliar o melhoramento das regras de expedição sobre o método FIFO (*first in first out*), ou seja, o primeiro a entrar será o primeiro a sair, método atualmente usado nos centros de processamento e distribuição de correios. O software usado para a simulação foi o ARENA.

De acordo com Stanevicius (2004), A rede logística da USPS (*United States Postal Service's*), Correio Americano, é extremamente complexa, onde milhões de endereços são visitados diariamente em um curto período de tempo.

A triagem de objetos postais, dentro de um centro de tratamento de correios, pode acontecer manualmente ou através de processos automáticos.

Sendo o processo de correio automatizado a chave para a redução significativa dos custos de trabalho dentro da UPS.

A simulação computacional dá para a USPS, uma alternativa de exploração do crescente tráfico postal. Também pode predizer confiantemente que o investimento em novas tecnologias, máquinas e sistemas de controle trarão com certeza uma elevação do nível requerido do serviço e uma redução do custo operacional.

Segundo, Xiangtong (2005), foi introduzido na USPS, um modelo de simulação com duplo objetivo, para completar duas decisões de suporte de sistemas.

O primeiro sistema designado para otimizar o agendamento diário dos equipamentos disponíveis e o segundo para otimizar o tamanho e composição da força permanente de trabalho, nos centros de tratamento (os manipuladores de correio), escalas de trabalho.

A simulação serviu como ponte entre os dois sistemas disponibilizados. A simulação computacional dá para a USPS, uma alternativa de exploração do crescente tráfego postal.

Wert, *et al.* (1991), citam o software SLAMII, como um modelo de simulação, para ser usado por gerentes de instalações de Correios para a avaliação e implementação de novas tecnologias. Incluindo sequenciamento de rotas, determinação do número de separações, etc.

Segundo Larsen (2003), As maiores organizações de Correios do mundo, USPS, Canadá Postal Corporation, Deutsch Post, Noruega Post, Bélgica Post (La Poste), Suíça Poste Post Dinamarca, usam a simulação com êxito para acelerar e dar suporte nas decisões de operações, desenvolvimento e validação para:

- Estratégias de automação para processos postais;
- Conceitos de processos postais, como sequenciamento;
- Localização de instalações e estratégias rede (captação e distribuição);
- Custos & alvo do mercado para produtos e portfólios;
- Táticas de balanceamento da equipe de trabalho e carga de trabalho;
- Capacidade das instalações e condições de leiautes.

Para Hunt *et al.* (1997), a simulação é uma efetiva ferramenta dentro da análise, e re-projeto de um processo de negócio. Tem sido utilizada por numerosas companhias, agencias de governo e universidades.

## 2.9 RESUMO

Neste capítulo, foi estudada a cadeia de suprimentos, robustez da cadeia de suprimentos, principais causas dos problemas de instabilidade da cadeia de suprimentos (modos de perturbações), mensuração do desempenho da cadeia de suprimentos, revisão da metodologia para a estimativa da robustez da cadeia de suprimentos (proposta por Vieira *et al.* (2009)).

Método Taguchi para projetos de robustez e projeto experimental (matrizes ortogonais, e razão sinal ruído), Método Superfície de resposta, Fundamentos da simulação computacional e Simulação aplicada aos Correios.

Para este trabalho, foi realizada uma simplificação da cadeia de suprimentos, considerando apenas os itens mais importantes para o CATE em estudo, visando à busca da eficiência desta cadeia.

Quanto a robustez da cadeia de suprimentos, os conceitos estudados serviram para fundamentar o objetivo deste trabalho, que é a busca pelo cenário mais robusto, ou seja, o cenário mais inaccessível as perturbações do meio.

O estudo das principais causas dos problemas e instabilidade da cadeia de suprimentos foi útil para fixar as variáveis deste trabalho. O estudo mostrou que os modos de perturbações são os seguintes: a oferta, meios de transporte, instalações, falhas no frete ou nas parcerias, falhas de comunicação e flutuações desenfreadas da demanda. Neste trabalho foram eleitas as seguintes perturbações (consideradas pelo autor como as mais importantes):

- Percentual de aumento esperado de demanda;
- Probabilidade de um único caminhão atrasar;
- Probabilidade de todos os caminhões atrasarem
- Tempo médio entre falhas (máquina de triagem de encomendas)

Não foram considerados, neste trabalho, o modo Oferta, modo falhas no frete e falhas de comunicação, por não serem consideradas expressivas por este autor.

No item estudado, Mensuração da cadeia de suprimentos, este trabalho optou pelas medidas baseadas em produtividade (Maximização da capacidade de utilização e maximização da utilização dos recursos).

Quanto às metas e tipos de desempenho da cadeia de suprimentos, proposta por Beamom (1999), tabela 3, este trabalho optou pelo tipo de mensuração do desempenho (saída).

Em relação ao estudo realizado sobre o Método Taguchi (projeto robusto), este trabalho, teve como base toda a concepção do método, ou seja, a busca pelo conjunto de condições para variáveis de projeto para as quais são robustas aos ruídos (perturbações), e minimizar o número de experimentos usando matrizes ortogonais e teste de confirmação, através da metodologia proposta por Vieira e Lemos (2009).

Outra ferramenta do Método Taguchi que foi estudada foi Razão sinal-ruído, que mede a qualidade com ênfase na variação e neste trabalho optou-se pelo uso da razão sinal-ruído quanto maior melhor, pois se busca maximizar a eficiência do CATE.

Para o estudo da ferramenta Superfície de resposta, este trabalho utilizou todos os conceitos estudados na busca do refinamento das respostas obtidas com o método Taguchi. e no APÊNDICE A, deste trabalho, há um exemplo para esclarecer quaisquer dúvidas que possam existir quanto a aplicação da ferramenta.

O estudo dos Fundamentos da simulação computacional foi útil para traçar a linha de como utilizar as ferramentas neste trabalho.

Finalmente o estudo da Simulação computacional aplicada aos correios, foi útil para ratificar a decisão de aplicar ferramentas operacionais (Método Taguchi, Simulação

computacional) juntamente com a simulação computacional no ambiente de uma empresa de correios.

### **3 APLICAÇÃO E ANÁLISE DOS MÉTODOS APRESENTADOS**

Após o embasamento teórico obtido através dos itens estudados no capítulo 2, o objetivo deste capítulo será a aplicação das ferramentas estudadas anteriormente, cujo objetivo é o de obter um projeto o mais robusto possível em uma empresa de correios. As aplicações serão sobre os seguintes assuntos:

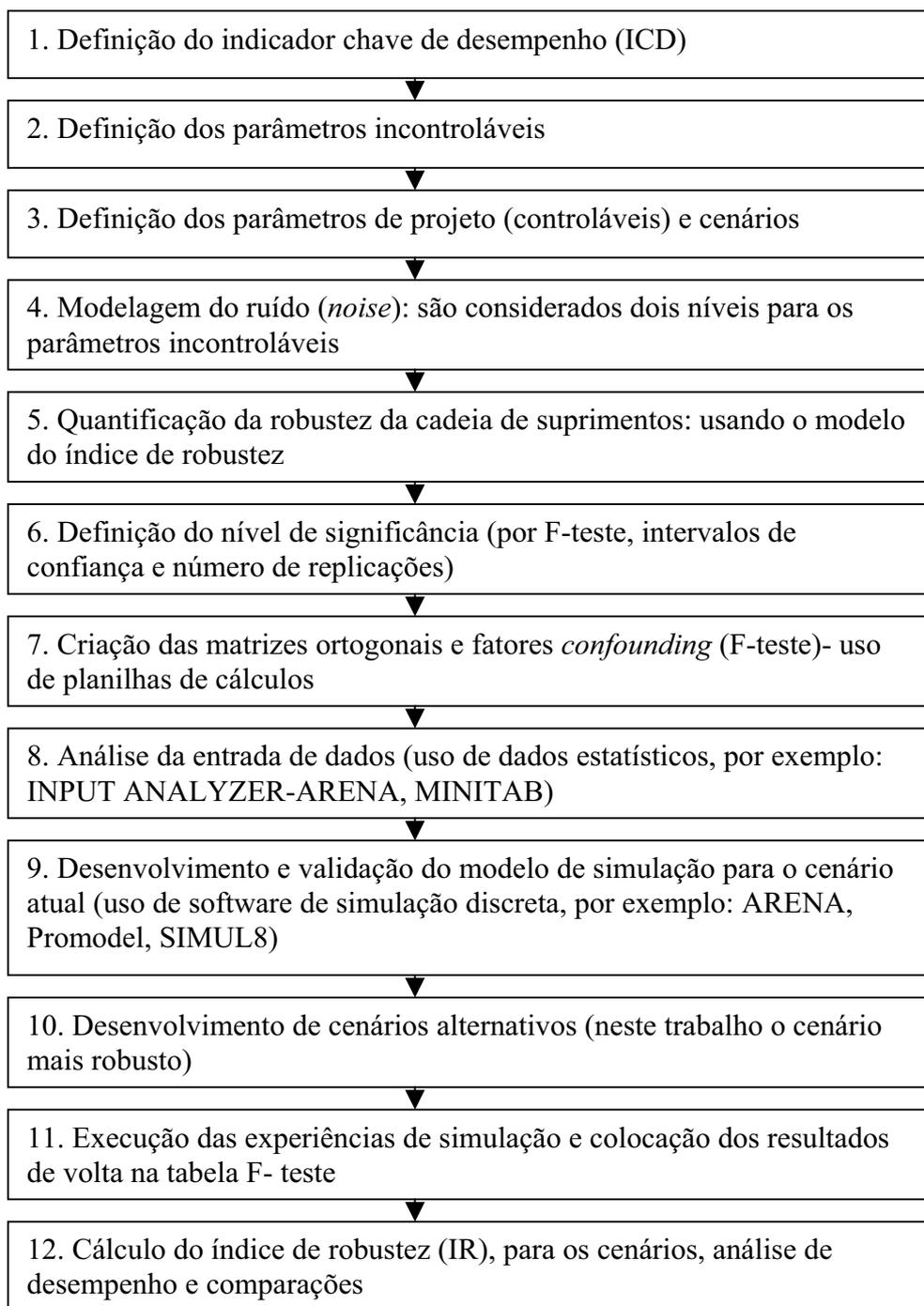
Aplicação do método Taguchi (matrizes ortogonais), usando a metodologia desenvolvida por Vieira *et al.* (2009);

Aplicação do método Taguchi (razão sinal-ruído), com o objetivo de ratificar o resultado obtido com a ferramenta anterior (matrizes ortogonais) ou rejeitar, na obtenção do cenário mais robusto, e a última aplicação será a aplicação do método superfície de resposta cujo objetivo é o de refinar o resultado obtido através da aplicação da última ferramenta (razão sinal-ruído).

#### **3.1 APLICAÇÃO DO MÉTODO TAGUCHI (MATRIZES ORTOGONAIS)**

##### **3.1.1 Aplicação da metodologia para a estimativa da robustez da cadeia de suprimentos**

Para relembrar os passos da metodologia, este trabalho repetirá a Figura 5,



**Figura 5** Passos da metodologia para estimativa da robustez da cadeia de suprimentos

Fonte: Vieira e Lemos (2009b)

### 3.1.1.1 Definir indicador chave de desempenho

O indicador chave de desempenho é à medida que define o desempenho de um sistema. Para a companhia em estudo, é essencial que a importação (carga expressa que chega ao CATE), possa ser triada e expedida através das 46 linhas de transporte disponíveis, para

serem distribuídas para a capital e a região metropolitana, antes das 08:00 h. Se isto acontecer o processo é considerado 100% eficiente, e se o processo terminar após as 09h30min a eficiência será nula, e o resto das encomendas que não foram triadas, serão triadas no dia seguinte, conseqüentemente a eficiência varia de 0% até 100% e pode ser estimada como:

$$EFIC . = \left( \frac{Núm \_ total \_ de \_ encomendas \_ triadas \_ até \_ 08 : 00 h}{Capacidade \_ produtiva \_ da \_ máquina} \right) . 100 \%$$

Esta análise irá considerar a situação mais crítica para a companhia, que é a operação durante a terceira semana de dezembro, de terça-feira a sábado, pois a demanda da segunda-feira, para encomendas expressas não é crítica.

A eficiência do sistema será a média das eficiências obtidas na simulação, mesmo embora, deva-se estimar este valor de forma precisa e com base estatística.

### 3.1.1.2 Definir parâmetros controláveis de projeto

Para a companhia em estudo, três parâmetros são considerados para melhorar a eficiência do sistema e a robustez, a “janela de tratamento” (A), o número de caminhões usados no deslocamento entre São Paulo e Curitiba e o nível de automação no processo de triagem (TMP). A Tabela 6 mostra o resultado da coleta dos dados para a caracterização dos parâmetros controláveis do cenário original (cenário 1), foram coletados os dados do mês de Dezembro de 2006, que foi o recorde de produção do referido CATE.

A primeira coluna da tabela refere-se à data do processamento e a hora do término do plano de triagem da máquina, a segunda coluna refere-se ao tempo em segundos desde o início deste plano (04:00h) até o seu término, por exemplo, a primeira linha o plano iniciou às 04:00h e terminou às 08:38 h, ou seja o tempo de processamento em segundos foi de 16.680 segundos. Dividindo 16.680 segundos pela produção total do dia (14.866 encomendas) obtem-se o tempo unitário de processamento de uma encomenda, no caso 1,12 segundos, descrito anteriormente por TMP- tempo médio de processamento de uma encomenda.

A penúltima coluna refere-se ao nível de automação (%). Resumidamente após a análise dos dados da tabela 6, o TMP, foi de 1,29 segundos (média dos valores pesquisados) que corresponde ao nível de automação de +/- 79%, para o cenário 1 (atual). O valor do TMP do melhor CATE (1,23 segundos) que corresponde a um nível de automação de 84%, foi obtido de maneira semelhante, coletando os dados do referido CATE. Os valores estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6 Coleta de dados

DEZEMBRO/2006

Data do plano	Tempo (sec.)	Tempo unit. enc.	Manual Qte.	%	Semi-autom. Qte.	%	Automático Qte.	%	TOTAL
1/12/2006 8:38	16680	1,12	2.334	15,70	691	4,65	11.841	79,65	14.866
2/12/2006 8:42	16920	1,15	2.558	17,42	471	3,21	11.653	79,37	14.682
5/12/2006 7:33	12780	1,54	1.633	19,68	370	4,46	6.296	75,86	8.299
6/12/2006 8:52	17520	1,24	2.381	16,84	384	2,72	11.376	80,45	14.141
7/12/2006 9:03	18180	1,14	2.485	15,59	589	3,70	12.861	80,71	15.935
8/12/2006 8:38	16680	1,30	2.169	16,84	64	0,50	10.644	82,66	12.877
9/12/2006 8:37	16620	1,14	2.485	17,07	126	0,87	11.95	82,07	14.561
12/12/2006 8:09	14940	1,13	1.943	14,72	425	3,22	10.833	82,06	13.201
13/12/2006 9:04	18240	1,14	2.763	17,32	201	1,26	12.991	81,42	15.955
14/12/2006 8:17	15420	1,24	1.923	15,47	230	1,85	10.274	82,67	12.427
15/12/2006 8:58	17880	1,23	3.479	23,87	289	1,98	10.808	74,15	14.576
16/12/2006 8:48	17280	1,19	2.565	17,71	321	2,22	11.594	80,07	14.480
19/12/2006 8:21	15660	1,21	1.804	13,94	514	3,97	10.623	82,09	12.941
20/12/2006 8:18	15480	1,15	2.210	16,46	185	1,38	11.032	82,16	13.427
21/12/2006 9:00	18000	1,20	2.517	16,77	448	2,99	12.042	80,24	15.007
22/12/2006 9:08	18480	1,22	2.915	19,24	239	1,58	11.996	79,18	15.150
23/12/2006 9:20	19200	1,23	2.575	16,50	321	2,06	12.712	81,45	15.608
27/12/2006 8:52	17520	1,73	1.783	17,58	224	2,21	8.134	80,21	10.141
28/12/2006 8:19	15540	1,29	2.08	17,26	656	5,44	9.314	77,29	12.050
29/12/2006 8:25	15900	1,59	1.92	19,17	911	9,09	7.187	71,74	10.018
30/12/2006 8:59	17940	2,03	1.863	21,05	173	1,95	6.815	77,00	8.851
<b>TOTAL</b>		<b>1,29</b>	<b>48.385</b>	<b>17,33</b>	<b>7.832</b>	<b>2,81</b>	<b>222.976</b>	<b>79,86</b>	<b>279.193</b>

A Tabela 7 mostra os três parâmetros, conforme situação atual da companhia em estudo e a situação em análise.

**Tabela 7** Possíveis configurações do projeto

		Atual (nível 1)	Em análise (nível 2)
Tempo disponível para a triagem “janela de tratamento”.	(A)	4 horas Das 04:00 h até as 08:00 h	5 horas Das 03:00 h até as 08:00 h
Número de caminhões usados no deslocamento entra São Paulo e a cidade da companhia em estudo.	(B)	6 caminhões	7 caminhões
Nível de automação no processo de triagem.	(C)	79% TMP= Tempo médio de processamento por encomenda TMP= 1,29 seg.	Utilizando o nível de automação do melhor CATE do país—84% TMP= 1,23 seg

Portanto, a análise será para oito cenários, conforme descrito na Tabela 8

**Tabela 8** Conjunto de cenários analisados

	Nível de automação (%) no processo de triagem e o TMP	Num. de caminhões usados no deslocamento São Paulo – cidade da companhia em estudo	Tempo disponível para a triagem “janela de tratamento”
Cenário 1 (atual)	79% (TMP= 1,29 seg.)	6 caminhões	4 horas
Cenário 2	84% (TMP= 1,23 seg.)	6 caminhões	4 horas
Cenário 3	79% (TMP= 1,29 seg.)	7 caminhões	4 horas
Cenário 4	84% (TMP= 1,23 seg.)	7 caminhões	4 horas
Cenário 5	79% (TMP= 1,29 seg.)	6 caminhões	5 horas
Cenário 6	84% (TMP= 1,23 seg.)	6 caminhões	5 horas
Cenário 7	79% (TMP= 1,29 seg.)	7 caminhões	5 horas
Cenário 8	84% (TMP= 1,23 seg.)	7 caminhões	5 horas

### 3.1.1.3 Definir parâmetros incontroláveis que afetam a robustez do projeto

O desempenho dos experimentos para a análise da robustez do projeto foi realizado via simulação computacional, usando o software ARENA.

A variável estocástica e os parâmetros usados nos modelos de simulação são os seguintes:

- % de aumento esperado de demanda: (D)
- Probabilidade de um único caminhão atrasar: (E)
- Tempo médio entre reparos (máquina de triagem): (F)
- Probabilidade de todos os caminhões atrasarem: (G)

### 3.1.1.4 Modelar o ruído

As variáveis incontroláveis são a razões para projetar um sistema robusto. Portanto, o efeito do ruído será considerado em cada um dos quatro parâmetros incontroláveis. Na Tabela

9, o ruído está representado pela variação do parâmetro, sendo valor atual versus o segundo valor afetado pelo ruído. Nesta análise tanto os fatores controláveis (de projeto) quanto os incontroláveis (afetados pelos ruídos) foram tratados sob apenas dois níveis, sendo nível 1 o valor atual e o nível 2 representa um novo valor afetado pelo ruído. Atualmente, os atrasos causados por caminhões ou rodovias com problemas são considerados na média de tempo de processamento-TMP (1,29 segundos). Espera-se, no entanto, que estes atrasos sejam crescentes, de fato, este estudo considera que haverá um aumento de 10% de atrasos causados pelo tráfego rodoviário e problemas de caminhões. Também considera a possibilidade de ter mais problemas relacionados com a máquina de triagem automatizada. Por esta razão, um aumento do número de falhas é considerado, ou seja, o tempo médio mudará de 70 para 65 horas. O tempo para reparar continuará o mesmo.

**Tabela 9** Dois níveis para cada parâmetro incontrolável

Variável ou parâmetro	Nível 1 Situação atual	Nível 2 Situação alternativa	Unidade
% de aumento esperado de demanda	0	5	%
Probabilidade de um único caminhão atrasar	0	10	%
Probabilidade de todos os caminhões atrasarem	0	6	%
Tempo médio entre Falhas (máquina de triagem)	70	65	horas

Após analisar a demanda atual, a melhor distribuição escolhida foi a triangular (8300, 15600, 16000) encomendas por dia, com base em dezembro de 2006 (demanda recorde do CATE em estudo), via simulação computacional, incrementando a demanda atual em 5%, a nova distribuição para o novo modelo de simulação será:  $1.05 \times \text{Triangular}(8300, 15600, 16000)$ .

O modelo de simulação do cenário atual está descrito na Figura 6. Basicamente, a cadeia de suprimentos para o modelo de simulação da importação do CATE em estudo é composto por cinco partes: no primeiro nível hierárquico (a), a estrutura total da simulação com os quatro principais processos e o painel (display) para a conferência.

No nível inferior, quatro “sub-modelos”, o primeiro (b) simula a demanda total diária, após a distribuição encontrada a partir dos dados pesquisados, a seguir o próximo sub-modelo (c), representa o processo de triagem em Curitiba, na seqüência o sub-modelo (d) a simulação de cada viagem dos caminhões que deslocam todos os pacotes (encomendas) a partir de São Paulo para Curitiba e por último o sub-modelo (e) que avalia o desempenho do sistema onde a eficiência é calculada.

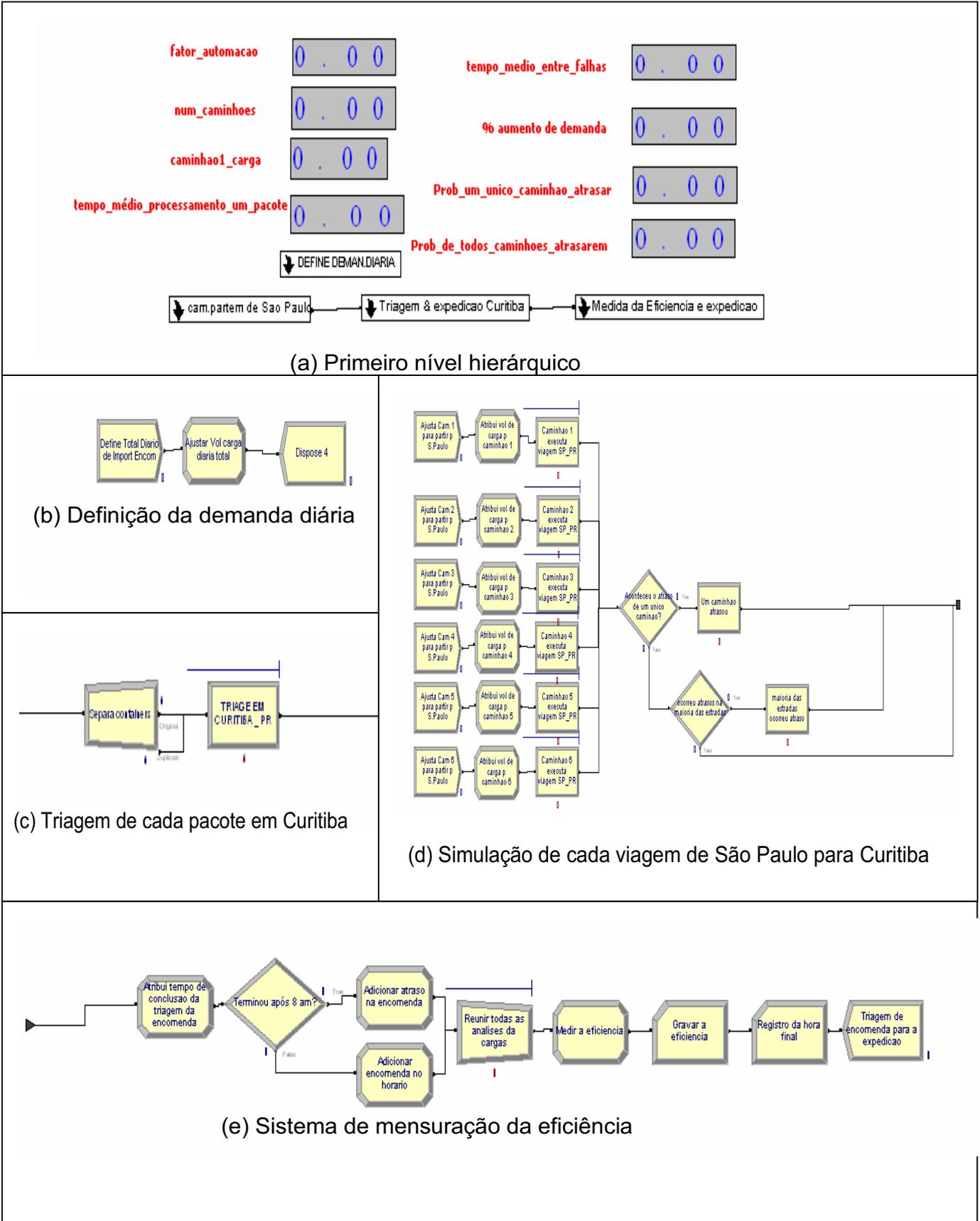


Figura 6 Modelo de simulação do cenário atual do processo de importação no ARENA

O resultado do desempenho do sistema para cada cenário simulado é mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 Resultado da simulação de todos os cenários

Cenário	Parâmetros controláveis de projeto				Parâmetros incontroláveis			Resultados da simulação		
	"janela de tratamento" (hrs.)	Nível de automação-TMP	Nº de caminhões	% acres. de demanda	Prob. de atraso de caminhão	Tempo médio de reparo	Prob. de todos caminhões. atrasarem	Eficiência média	Eficiência mínima	Eficiência máxima
1	4	1,29	6	0	0	70	0	81.75	58,88	100
	4	1,29	6	0	0	60	6	81.8	58,88	100
	4	1,29	6	0	10	70	6	81.15	55.58	100
	4	1,29	6	0	10	60	0	81.02	48.04	100
	4	1,29	6	5	0	70	6	78.33	56.07	100
	4	1,29	6	5	0	60	0	78.4	56.07	100
	4	1,29	6	5	10	70	0	77.91	52.93	100
	4	1,29	6	5	10	60	6	77.54	45.75	100
2	4	1,23	6	0	0	70	0	85.45	58,88	100
	4	1,23	6	0	0	60	6	85.48	58,88	100
	4	1,23	6	0	10	70	6	84.77	55.58	100
	4	1,23	6	0	10	60	0	84.68	48.04	100
	4	1,23	6	5	0	70	6	81.91	56.07	100
	4	1,23	6	5	0	60	0	82	56.07	100
	4	1,23	6	5	10	70	0	81.48	52.93	100
	4	1,23	6	5	10	60	6	81.04	45.75	100
3	4	1,29	7	0	0	70	0	82.23	50.87	100
	4	1,29	7	0	0	60	6	81.63	48.04	100
	4	1,29	7	0	10	70	6	80.73	16.58	100
	4	1,29	7	0	10	60	0	80.9	45.07	100
	4	1,29	7	5	0	70	6	78.79	48.44	100
	4	1,29	7	5	0	60	0	78.28	45.75	100
	4	1,29	7	5	10	70	0	77.55	15.79	100
	4	1,29	7	5	10	60	6	77.5	42.93	100
4	4	1,23	7	0	0	70	0	85.96	53.54	100
	4	1,23	7	0	0	60	6	85.22	50.56	100
	4	1,23	7	0	10	70	6	84.14	17.46	100
	4	1,23	7	0	10	60	0	84.58	47.45	100
	4	1,23	7	5	0	70	6	82.39	50.99	100
	4	1,23	7	5	0	60	0	81.88	48.15	100
	4	1,23	7	5	10	70	0	80.97	16.62	100
	4	1,23	7	5	10	60	6	81.00	45.19	100
5	5	1,29	6	0	0	70	0	96.18	78.81	100
	5	1,29	6	0	0	60	6	95.19	78.53	100
	5	1,29	6	0	10	70	6	94.51	74.4	100
	5	1,29	6	0	10	60	0	94.99	67.17	100
	5	1,29	6	5	0	70	6	93.38	75.06	100
	5	1,29	6	5	0	60	0	93.63	74.79	100
	5	1,29	6	5	10	70	0	93.26	70.85	100
	5	1,29	6	5	10	60	6	92.09	63.98	100
6	5	1,23	6	0	0	70	0	97.85	82.96	100
	5	1,23	6	0	0	60	6	96.87	82.66	100
	5	1,23	6	0	10	70	6	96.07	78.31	100
	5	1,23	6	0	10	60	0	96.63	70.71	100
	5	1,23	6	5	0	70	6	95.59	79.01	100
	5	1,23	6	5	0	60	0	95.95	78.73	100
	5	1,23	6	5	10	70	0	95.48	74.58	100
	5	1,23	6	5	10	60	6	94.19	67.35	100
7	5	1,29	7	0	0	70	0	96.19	69.69	100
	5	1,29	7	0	0	60	6	94.56	67.17	100
	5	1,29	7	0	10	70	6	93.26	33.37	100
	5	1,29	7	0	10	60	0	94.09	45.07	100
	5	1,29	7	5	0	70	6	93.38	66.36	100
	5	1,29	7	5	0	60	0	93.27	63.98	100
	5	1,29	7	5	10	70	0	92.06	31.78	100
	5	1,29	7	5	10	60	6	91.41	42.93	100
8	5	1,23	7	0	0	70	0	97.86	73.35	100
	5	1,23	7	0	0	60	6	96.11	70.71	100
	5	1,23	7	0	10	70	6	94.63	35.13	100
	5	1,23	7	0	10	60	0	95.54	47.45	100
	5	1,23	7	5	0	70	6	95.47	69.86	100
	5	1,23	7	5	0	60	0	95.44	67.35	100
	5	1,23	7	5	10	70	0	94.13	33.45	100
	5	1,23	7	5	10	60	6	93.36	45.19	100

### 3.1.1.5 Criar matrizes ortogonais e o delineamento de experimento

Para a empresa em estudo, a maximização do processo é medida pela maximização da eficiência, e os fatores suspeitos de afetar a eficiência são os seguintes, com os seus dois níveis (originados da tabela 16):

A: Percentual de aumento de demanda:	A-1=0%	A1=5%
B: Probabilidade de um caminhão atrasar:	B-1=0%	B1=7%
C: Tempo médio entre falhas e reparos:	C-1=70h	C1=65h
D: Probabilidade de todos os caminhões atrasarem	D-1=0%	D1=3%

Desde que há quatro fatores, há seis possibilidades para a interação de dois fatores (AB, AC, AD, BC, CD), mas para a empresa de correios em estudo é interessante que nenhuma exista na prática. Desde que há quatro fatores e não há interação, somente cinco colunas são necessárias para alocar estas fontes de variação, e L8 é suficiente para esta proposta porque ela possui sete colunas, esta alocação, para o cenário 1, é mostrada na Tabela 11

**Tabela 11** Alocação de fatores e interação para L8, para a empresa de correios em estudo

números de experimentos.	Numeros de colunas							condições experimentais	Cen.1(%)-obtido por simulação
	1	2	3	4	5	6	7		
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	A-1B-1C-1D-1	<b>81,75</b>
2	-1	-1	-1	1	1	1	1	A-1B-1C1D1	81,60
3	-1	1	1	-1	-1	1	1	A-1B1C-1D1	81,15
4	-1	1	1	1	1	-1	-1	A-1B1C1D-1	81,02
5	1	-1	1	-1	1	-1	1	A1B-1C-1D-1	78,33
6	1	-1	1	1	-1	1	-1	A1B-1C1D-1	78,40
7	1	1	-1	-1	1	1	-1	A1B1C-1D-1	77,91
8	1	1	-1	1	-1	-1	1	A1B1C1D1	77,54
marca básica atribuição	a	b	-ab	c	-ac	-bc	abc	<b>Total</b>	<b>637,70</b>
	<b>A</b>	<b>B</b>	erro	<b>C</b>	erro	erro	<b>D</b>		

E a soma dos quadrados é mostrada na Tabela 12 Computação da variação por L8 para o cenário 1, a seguir, adaptado de Park (1996).

**Tabela 12** Computação da variação por L8, para o cenário 1

Número de colunas	1		2		3		4		5		6		7	
Força	A		B		erro		C		erro		erro		D	
Nível	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
Dados	81.75	0	81.75	0	81.75	0	81.75	0	81.75	0	81.75	0	81.75	0
	81.8	0	81.8	0	81.8	0	0	81.8	0	81.8	0	81.8	0	81.8
	81.15	0	0	81.15	0	81.15	81.15	0	81.15	0	0	81.15	0	81.15
	81.02	0	0	81.02	0	81.02	0	81.02	0	81.02	81.02	0	81.02	0
	0	78.33	78.33	0	0	78.33	78.33	0	0	78.33	78.33	0	0	78.33
	0	78.4	78.4	0	0	78.4	0	78.4	78.4	0	0	78.4	78.4	0
	0	77.91	0	77.91	77.91	0	77.91	0	0	77.91	0	77.91	77.91	0
	0	77.54	0	77.54	77.54	0	0	77.54	77.54	0	77.54	0	0	77.54
(1) soma dos níveis	325.72	312.18	320.28	317.62	319	318.9	319.14	318.76	318.84	319.06	318.64	319.26	319.08	318.82
(2) soma de (1)	637.9		637.9		637.9		637.9		637.9		637.9		637.9	
(3) diferença de (1)	-13.54		-2.66		-0.10		-0.38		0.22		0.62		-0.26	
(4) (3) <sup>2</sup>	183.33		7.08		0.01		0.14		0.05		0.38		0.07	
(5) (4)/8	22.92		0.88		0.00		0.02		0.01		0.05		0.01	

A última fila da tabela 12, mostra a variação de cada fonte, desde que existam três colunas para os erros, o erro da soma dos quadrados é a variação dentro das colunas 3, 5 e 6.

A variação de cada coluna é computada por:

$[(\text{soma dos dados de nível } 1) - (\text{soma dos dados no nível } -1)]^2 / 8$ , que é calculado na tabela 19

Cada elemento tem 1 grau de liberdade - DOF ( $\Phi_1 = 1$ ), porque este é um projeto fatorial de dois níveis e o erro tem três DOF ( $\Phi_2$ ), uma vez que existem 3 colunas usadas como erro. A média quadrática é uma divisão do fator variação pelo seu correspondente grau de liberdade (DOF). De uma tabela F - distribuição, F ( $\Phi_1 = 1, \Phi_2 = 3, \alpha = 5\%$ ) = 10,1. Basta dividir  $V_i$  (linha 5), pelo erro quadrático médio  $V_e$  ( $F_0$ ). Um grande valor desta divisão implica que o fator ou interação: (i) é significativo, a saber, se  $F_i > F(\Phi_1, \Phi_2, \alpha)$ , afirma-se que o fator ou interação i tem um significativo efeito sobre o desempenho do sistema. O contrário disto é a robustez. Um fator com impacto significativo sobre o desempenho do sistema significa que o sistema não é robusto à variação considerada (níveis 1 e -1), com um dado nível significância ( $\alpha$ ).

A tabela ANOVA (Tabela 13) abaixo, que mostra que fatores A e B são significativos para a eficiência do sistema em nível de 5%. Em termos de robustez, isto significa que a eficiência da importação da empresa em estudo, será de aproximadamente a mesma para as variações relativas ao aumento nas falhas da máquina e aumento da probabilidade de todos os caminhões atrasarem, mas não suficientemente robusto para o aumento das variações da demanda e ao atraso de um único caminhão.

**Tabela 13** ANOVA tabela para experimentos

Fatores de variações	Graus de liberdade	soma dos quadrados(5)	MÉDIA QUADRADA $V_i=(5)/\text{grau de lib.}$	$F_i=(V_i/V_e)$	$F(f_1=1; f_2=3; \alpha=5\%)$	variação significativa p/ a = 5%	Robustez para a cadeia de suprím. para a variação de 5%
A :	1	22,92	22,91645	1.242,08	10,1	sim	não
B:	1	0,88	0,88445	47,94	10,1	sim	não
C:	1	0,02	0,01805	0,98	10,1	não	sim
D:	1	0,01	0,00845	0,46	10,1	não	sim
erro 1	1	0,00	0,00125				
erro 2	1	0,01	0,00605				
erro 3	1	0,05	0,04805				
erro total	3	0,055	$V_e=$ 0,0184				

### 3.1.1.6 Executar os experimentos de simulação e análises F-testes

Para a empresa de correios em estudo, foi dada maior importância para o aumento da demanda (peso 4), conforme o parecer do projetista deste trabalho, para a probabilidade de atraso de um único caminhão foi dado peso 2, e para as probabilidades de falhas na máquina de triagem e na probabilidade de todos os caminhões atrasarem foi dado peso 1 (por terem estes eventos possibilidades remotas de ocorrerem).

A Tabela 14, mostra os resultados para o cenário 8.

**Tabela 14** Importância dos pesos para o índice de robustez

Fatores (força de variação),	Importância Pesos	Robustez p/ variação	Robustez p/ variação	Robustez para a cadeia de suprimentos
A : % de aumento de demanda esperada	4	1	50,00%	50,00%
B: Probabilidade de um caminhão atrasar	2	0	25,00%	0,00%
C: Tempo médio entre paradas	1	1	12,50%	12,50%
D: Probabilidade da maioria dos caminhões atrasarem	1	1	12,50%	12,50%
soma	8		RI	75,00%

### 3.1.1.7 Calcular a robustez para todos os cenários

A Tabela 15 mostra o resultado dos cálculos para os índice de robustez (IR) para todos os cenários analisados (usando o desvio padrão como uma estimativa para o erro).

**Tabela 15** IR para todos os cenários analisados usando o desvio padrão como uma estimativa de erro

	Cen.1	Cen.2	Cen.3	Cen.4	Cen.5	Cen.6	Cen.7	Cen.8
A	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	50.00%
B	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	25.00%	0.00%	0.00%
C	12.50%	12.50%	12.50%	12.50%	12.50%	12.50%	12.50%	12.50%
D	12.50%	12.50%	12.50%	12.50%	12.50%	12.50%	12.50%	12.50%
RI	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	50.00%	25.00%	75.00%
<b>Desvio</b>	<b>1,85</b>	<b>1,91</b>	<b>1,89</b>	<b>1,95</b>	<b>1,31</b>	<b>1,09</b>	<b>1,48</b>	<b>1,36</b>
<b>Padrão</b>								
Ve = Error/ $\Phi$ 2	0.64	0.64	0.63	0.65	0.44	0.36	0.49	0.45

Com o uso do desvio padrão, o único cenário que é razoavelmente robusto é o cenário 8, os demais não são robustos.

O cenário 8, adicionou mais um caminhão para a frota, ou seja, aumentou de 6 para 7 caminhões e iniciou o processo de triagem uma hora mais cedo, ou seja, iniciou as 03h00min e melhorou o nível de automação. Este cenário é entre as opções o mais robusto cenário para a cadeia de suprimentos da empresa de correios em estudo.

## 3.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO TAGUCHI (RAZÃO SINAL- RUÍDO)

Como o objetivo desta pesquisa é de buscar um processo o mais robusto possível através do uso de ferramentas distintas (método Taguchi-matrizes ortogonais e razão sinal ruído) e Superfície de resposta, a parte inicial do desenvolvimento das ferramentas matrizes ortogonais e Razão sinal ruído será a mesma, ou seja, os itens 3.1.1.1 Definição do indicador chave de desempenho, 3.1.1.2 Definição dos parâmetros controláveis, 3.1.1.3 Definição dos parâmetros incontroláveis e o item 3.1.1.4 Modelando o ruído, será repetido para as respectivas ferramentas, para que estas possuam a mesma base inicial e conseqüentemente possam ser comparadas posteriormente.

### **3.2.1 Combinar os fatores controláveis com fatores incontroláveis usando matriz ortogonal para a obtenção da combinação ótima**

Como foi visto anteriormente na Tabela 14 e no item 3.1.1.3, os fatores controláveis são três, A (janela de tratamento), B (nº de caminhões usados) e C (nível de automação) e os incontroláveis são quatro: D, E, F e G. Foi escolhida uma matriz L-8 para a matriz interna (*inner array*) e uma matriz L-8 para a matriz externa, uma vez que a matriz L-8 é útil para até sete fatores.

O resultado da interação das duas matrizes gerou 64 (8x8) combinações, conforme mostrado na Tabela 16- Parâmetros de projeto com matriz interna e matriz externa e os resultados experimentais. Na matriz ortogonal interna foi atribuído para a coluna 1 o fator A, para a 2 o fator B e para a 3 o fator C e para as demais colunas não foram atribuídos valores, de acordo com Shang (1995).

Para a matriz externa, atribui-se para a coluna 1 o fator D, para a coluna 2 o fator E, para a coluna 3 o fator F e para a coluna 4 o fator G, e para as demais colunas não foram atribuídos valores.

As 64 combinações foram extraídas da simulação computacional que estão descritas na Tabela 10, na coluna “eficiência média”, pois o objetivo desta pesquisa é a obtenção do

cenário mais robusto em termos de eficiência, ou seja, aquele que possua o maior valor de SN, segundo Taguchi (2005). Nesta pesquisa não foram considerados as interações entre os fatores, por pura decisão do autor deste trabalho.

Segundo Shang (1995), Taguchi recomenda analisar os resultados através de gráficos e resumo das medições para manter a análise simples, ou seja, calcular os efeitos médios de cada fator associado a cada nível para todas as replicações, baseado neste pensamento calculamos os efeitos médios para cada nível, ou seja, nível 1 e nível 2. Na Tabela 16, as últimas duas colunas representam respectivamente o Y médio, que é média dos resultados dos experimentos de cada fila e o SN dos resultados de cada fila, no caso, como se deseja maximizar a eficiência foi usado a característica quanto maior melhor para o cálculo do SN (fórmula 2.3). Através da Tabela 16, obtemos, por exemplo, o efeito médio para o fator A no nível 1:  $A1 = (79.74 + 83.35 + 79.70 + 83.26)/4 = 81.52$ , o efeito médio para o fator A no nível 2:  $A2 = (94.15 + 96.08 + 93.53 + 95.32)/4 = 94.77$ . A média para o SN para cada nível dos fatores controláveis é calculada de maneira semelhante. Por exemplo: SN médio para o fator A para o nível 1:

$$\text{SN médio } A1 = (38.03 + 38.41 + 38.02 + 38.40)/4 = 38.21 \text{ db}$$

$$\text{SN médio } A2 = (39.47 + 39.65 + 39.42 + 39.58)/4 = 39.53 \text{ db}$$

**Tabela 16** Parâmetros de projeto com matriz interna e matriz externa e os resultados experimentais

		Matriz externa								Matriz interna							Y médio	SN								
		Nº experimento ->																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	A	B	C	X	X	X	X										
										1	2	3	4	5	6	7										
	D	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	81.75	81.8	81.15	81.02	78.33	78.4	77.94	77.54	79.74	38.03
	E	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	85.43	85.48	84.77	84.68	81.91	82	81.48	81.04	83.35	38.41
	F	1	1	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2	2	2	82.23	81.63	80.73	80.9	78.79	78.28	77.55	77.5	79.70	38.02
	G	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	1	1	1	85.96	85.22	84.14	84.58	82.34	81.88	80.97	81	83.26	38.4
	X	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	1	2	1	1	1	96.18	95.19	94.51	94.99	93.38	93.63	93.26	92.09	94.15	39.47
	X	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2	1	2	1	1	1	97.85	96.87	96.07	96.63	95.59	95.95	95.48	94.19	96.08	39.65
	X	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	96.19	94.56	93.26	94.09	93.38	93.27	92.06	91.41	93.53	39.42
	X	1	2	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	1	1	97.86	96.11	94.63	95.54	95.47	95.44	94.13	93.36	95.32	39.58
																	<b>88.14</b>	<b>38.87</b>								

Na Tabela 17 sumariza-se a resposta média e os SNs para cada nível dos fatores controláveis (segundo a abordagem recomendada por Shang *et al.*,1995).

**Tabela 17** Resposta de cada nível dos fatores

<b>Fatores</b>	<b>Dados da saída</b>	<b>S/N</b>
<b>Fator A</b>		
nível 1	81.52	38.21
nível 2	94.77	39.53
<b>Fator B</b>		
nível 1	88.33	38.89
nível 2	87.95	38.85
<b>Fator C</b>		
nível 1	87.98	38.86
nível 2	88.3	38.88

O método Taguchi enfatiza a maximização dos SNs, o que conduz as seguintes condições ótimas: A2, B1 e C2, de acordo com ROY (2001), o resultado esperado em condições ótimas será o seguinte:  $Y_{\text{ótimo}} = T_{\text{médio}} + (A2 - T_{\text{médio}}) + (B1 - T_{\text{médio}}) + (C2 - T_{\text{médio}})$ , onde  $T_{\text{médio}}$  é a média dos valores de saída = 88.14, oriundo da Tabela 16. Portanto as condições ótimas serão as seguintes:

- **Janela de tratamento** = 5 horas (A2);
- **Nº. de caminhões usados na viagem entre São Paulo e Curitiba** = 6 caminhões (B1);
- **Nível de automação para o processo** = 84%- TMP= 1.23 seg. (C2),

O resultado médio ótimo será o seguinte:

$$Y_{\text{ótimo}} = 88.14 + (94.77 - 88.14) + (88.33 - 88.14) + (88.30 - 88.14) = 95.12$$

Similarmente o SN ótimo esperado será o seguinte:

$$SN_{\text{ótimo}} = 38.87 + (39.53 - 38.87) + (38.89 - 38.87) + (38.88 - 38.87) = 39.56$$

Buscando os resultados ótimos descritos acima na Tabela 10, o experimento que mais se aproxima dos resultados esperados ótimo é o cenário 6.

No entanto, os valores para os níveis 1 e 2 dos fatores B e C estão muito próximos, por esta razão a interação citada por Taguchi *et al.* (2005) foi usada, onde os autores advertem

que se podemos expressar a função usando a característica *small-the-better* ou *larger-to-better*, o resultado terá uma melhor chance de ser reproduzido se interagindo (somado) as duas características.

Na Tabela 18, com dados obtidos da simulação computacional (Tabela 10), calcula-se a interação dos SNs. Sendo considerado a eficiência média do CATE ( $y$ ), como a característica *large-the-better*, ou seja, quanto maior a eficiência melhor e a ineficiência média (1-eficiência) como *small-the-better* (quanto menor a ineficiência melhor). Portanto, este projeto deve utilizar as fórmulas (2.2) e (2.3).

Após a análise dos oito cenários e os seus respectivos resultados (mostrados na Tabela 18), o cenário mais robusto foi o cenário 6, pois apresenta o maior valor para a interação entre os SNs (última coluna).

**Tabela 18** Cálculos da interação das características *small-the better* (1) e *large-the-better* (2)

Cenário	Eficiência média	$SN = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$	Ineficiência eficiência) (1-	$SN = -10 \log \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$	Interação das fórmula (2) e(1) (Qto. Maior melhor + Qto. Menor melhor)
1	81.75		18.25		
	81.80		18.20		
	81.15		18.85		
	81.02		18.98		
	78.33		21.67		
	78.40		21.60		
	77.91		22.09		
	77.54		22.46		
		38.03		-26.17	11.86
2	85.45		14.55		
	85.48		14.52		
	84.77		15.23		
	84.68		15.32		
	81.91		18.09		
	82.00		18.00		
	81.48		18.52		
	81.04		18.96		
		38.41		-24.48	13.93
3	82.23		17.77		
	81.63		18.37		
	80.73		19.27		
	80.90		19.10		
	78.79		21.21		
	78.28		21.72		
	77.55		22.45		
	77.50		22.50		
		38.02		-26.18	11.84
4	85.96		14.04		
	85.22		14.78		
	84.14		15.86		
	84.58		15.42		
	82.39		17.61		
	81.88		18.12		
	80.97		19.03		
	81.00		19.00		
		38.40		-24.52	13.88
5	96.18		3.82		
	95.19		4.81		
	94.51		5.49		
	94.99		5.01		
	93.38		6.62		
	93.63		6.37		
	93.26		6.74		
	92.09		7.91		
		39.47		-15.52	23.95
6	97.85		2.15		
	96.87		3.13		
	96.07		3.93		
	96.63		3.37		
	95.59		4.41		
	95.95		4.05		
	95.48		4.52		
	94.19		5.81		
		39.65		-12.15	27.50
7	96.19		3.81		
	94.56		5.44		
	93.26		6.74		
	94.09		5.91		
	93.38		6.62		
	93.27		6.73		
	92.06		7.94		
	91.41		8.59		
		39.42		-16.41	23.01
8	97.86		2.14		
	96.11		3.89		
	94.63		5.37		
	95.54		4.46		
	95.47		4.53		
	95.44		4.56		
	94.13		5.87		
	93.36		6.64		
		39.58		-13.72	25.86

Assim, comparando os resultados ótimos com os resultados da interação dos SNs, conclui-se que o cenário mais robusto para a companhia em estudo acontece quando o processo de triagem começa uma hora mais cedo do que o usual, necessitando de um nível de automação de 84% (TMP=1,23 segundos) e utilizando-se de 6 caminhões para realizar o trajeto entre São Paulo e Curitiba.

### 3.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

#### 3.3.1 Definição dos fatores para o ajuste do modelo de primeira ordem

Os fatores usados nesta seção serão os fatores ótimos devidos ao método Taguchi, apresentados na aplicação 3.2 (método Taguchi- razão sinal-ruído), ou seja,  $A_2 = 5$  horas,  $B_1 = 6$  caminhões e  $C_2 = 1,23$  segundos.

Acredita-se que a variação de 1 hora no fator A, 1 caminhão no fator B e de 0,6 segundo para o fator C, a partir do ponto central, seriam capazes de provocar alterações significativas na eficiência operacional, ou seja, a região que foi delimitada pelos intervalos foram as seguintes: para o fator A (4, 6), fator B (5, 7) e para o fator C(1,17, 1,29).

Os fatores sob a forma codificada (representados no intervalo -1 e 1), representados por  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , são os seguintes, obtida da fórmula 2.9

$$x_1 = \frac{w_1 - 5}{1}, \quad x_2 = \frac{w_2 - 6}{1} \quad \text{e} \quad x_3 = \frac{w_3 - 1,23}{0,06}$$

Os dados coletados no estudo e o resultado da simulação são apresentados na tabela 19, o projeto usado para a coleta de dados é o  $2^k$  fatorial, ou seja,  $2^3$  fatorial aumentado por 6 pontos centrais, de acordo com Shang *et al.* 2004, usados para a estimativa dos erros e para permitir a checagem do modelo de primeira ordem.

**Tabela 19** Medidas da eficiência obtidas no experimento para o ajuste do modelo de primeira ordem.

Variáveis			Variáveis Codificadas			Resposta
A (w <sub>1</sub> )	B (w <sub>2</sub> )	C (w <sub>3</sub> )	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	Eficiência (y)
Fatores						(%)
4	5	1,17	-1	-1	-1	85,00
4	7	1,17	1	-1	-1	84,10
4	5	1,29	-1	1	-1	86,50
6	7	1,17	1	1	-1	87,50
4	7	1,29	-1	-1	1	88,20
6	5	1,29	1	-1	1	88,30
6	5	1,17	-1	1	1	89,00
6	7	1,29	1	1	1	88,97
<b>5</b>	<b>6</b>	<b>1,23</b>	0	0	0	87,98
5	6	1,23	0	0	0	86,00
5	6	1,23	0	0	0	86,70
5	6	1,23	0	0	0	86,90
5	6	1,23	0	0	0	86,80
5	6	1,23	0	0	0	87,01

O modelo de regressão  $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon$ , foi ajustado pelo método dos mínimos quadrados, ou pelo software MINITAB, resultando o seguinte modelo de primeira ordem:

$$\hat{y} = 87,1 + 0,021 x_1 + 0,796 x_2 + 1,42 x_3$$

Como o experimento foi planejado de modo que seis observações foram coletadas no ponto (0,0), foi possível avaliar a adequação do modelo, pelo teste de falta de ajuste.

A análise de variância foi realizada para a avaliação da significância da regressão e para a falta de ajuste, sendo que a soma dos quadrados será expressa pelas fórmulas 2.23 a 2.27.

Os dados desta análise estão sumarizados na Tabela 20, considerando o nível de confiança de 95% , ou seja, nível de significância de 5%,  $\alpha = 0,05$  e as seguintes hipóteses para a falta de ajuste:

$$H_0: \hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon, \text{ se ajusta bem aos dados do modelo linear}$$

$$H_1: \hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon, \text{ não se ajusta bem aos dados do modelo linear.}$$

**Tabela 20** Análise de variância

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fo	p-valor
Regressão	21,230	3	7,077	14,99	0,000
Residual	4,720	10	0,472		
(Falta de ajuste)	2,680	5	0,536	1,31	0,386
(Erro puro)	2,040	5	0,408		
Total	25,950	13			

Para a falta de ajuste foi obtido o valor p-valor = 0,386 > 0,05 (nível de significância), o modelo se ajusta bem aos dados coletados, ou seja, a hipótese  $H_0$  é aceita.

Para a regressão foi obtido p-valor = 0,000 < 0,05, ou seja, a regressão é significativa.

Como o modelo de primeira ordem é adequado, passa-se para as próximas etapas do método de máxima inclinação ascendente.

### 3.3.2 Utilizar as informações obtidas na etapa anterior para determinar a direção de máxima inclinação ascendente

a)- Obtido da equação 2.10,  $\Delta x_i = \hat{\beta}_i / \hat{\beta}_j$ , a variável com o maior valor absoluto é a  $x_3$ , onde  $\beta_3 = 1,42$ , sendo assim, o passo de  $X_3 = 1,42/1,42 = 1$ , e por analogia os demais passos serão os seguintes:  $X_1 = 0,021/1,42 = 0,01479$  e  $X_2 = 0,796/1,42 = 0,56056$ .

Pelo conhecimento sobre o processo da empresa em estudo atribuíram-se os seguintes passos para os três fatores:  $S_1 = -5$ ,  $S_2 = 0,13$  e  $S_3 = -0,004$  (segundo a abordagem de Shang (1995) e Shang *et al.* (2004)), e a conversão dos passos para variáveis naturais obtidos através da fórmula 2.11, são as seguintes:

$$\Delta S_1 = \Delta X_1 * S_1 = 0,01479 \times -5 = -0,074$$

$$\Delta S_2 = \Delta X_2 * S_2 = 0,56056 \times 0,13 = 0,073$$

$$\Delta S_3 = \Delta X_3 * S_3 = 1 \times -0,004 = -0,004$$

Os valores dos  $X_i$  e dos  $\Delta S_i$  estão alocados na fila  $\Delta$ , na tabela 21 a seguir.

**Tabela 21** Medidas da eficiência (%) obtidas na direção de máxima inclinação ascendente

		Variáveis			Variáveis codificadas			Y
		X1	X2	X3	A	B	C	
Origem		0	0	0	5	6	1.23	
$\Delta$		0.0148	0.5606	1	-0.074	0.073	-0.004	Eficiência
Origem + 1	$\Delta$	0.0148	0.5606	1	4.926	6.073	1.226	81.85
Origem + 2	$\Delta$	0.0296	1.1212	2	4.852	6.146	1.222	83.57
Origem + 3	$\Delta$	0.0444	1.6818	3	4.778	6.219	1.218	85.28
Origem + 4	$\Delta$	0.0592	2.2424	4	4.704	6.292	1.214	87.00
Origem + 5	$\Delta$	0.0740	2.8030	5	4.630	6.365	1.210	88.72
Origem + 6	$\Delta$	0.0888	3.3636	6	4.556	6.438	1.206	90.44
Origem + 7	$\Delta$	0.1036	3.9242	7	4.482	6.511	1.202	92.15
Origem + 8	$\Delta$	0.1184	4.4848	8	<b>4.408</b>	<b>6.584</b>	<b>1.198</b>	<b>93.87</b>
Origem + 9	$\Delta$	0.1332	5.0454	9	4.334	6.657	1.194	85.59
Origem + 10	$\Delta$	0.1480	5.6060	10	4.260	6.730	1.190	85.02
Origem + 11	$\Delta$	0.1628	6.1666	11	4.186	6.803	1.186	84.20
Origem + 12	$\Delta$	0.1776	6.7272	12	4.112	6.876	1.182	84.30
Origem + 13	$\Delta$	0.1924	7.2878	13	4.038	6.949	1.178	83.90
Origem + 14	$\Delta$	0.2072	7.8484	14	3.964	7.022	1.174	83.20

Observando os dados na Tabela 21, nota-se que até o passo 8 o rendimento vai aumentando e a partir daí o rendimento começa a decair, portanto a adequação do modelo de primeira ordem será em torno dos pontos 4,408, 6,584 e 1,198.

A região onde os dados foram coletados foi delimitada pelos seguintes intervalos: fator A (3,408 e 5,408) horas, fator B(5,584 e 7,584) e fator C(1,138 e 1,258). Foi mantida a mesma amplitude para as variações, pois se acredita que variações de ordem de 1 hora, 1 caminhão e 0,06 segundo., a partir do ponto central eram suficientes para provocar variações significativas na eficiência do CATE e ao mesmo tempo gerariam uma pequena região, de forma que pudesse ser bem representado pelo modelo de primeira ordem.

Os fatores sob a forma codificada foram definidos de acordo com a equação (2.9)

$$X1 = \frac{w1 - 4,408}{1} \quad X2 = \frac{w2 - 6,584}{1} \quad X3 = \frac{w3 - 1,198}{0,06} \quad (3.1)$$

Os dados coletados no estudo e o resultado da simulação são apresentados na Tabela 22, o projeto usado para a coleta de dados é o  $2^k$  fatorial, ou seja,  $2^3$  fatorial aumentado por 6 pontos centrais, usados para a estimativa dos erros e para permitir a checagem do modelo de primeira ordem.

O resultado da simulação com os valores citados acima estão na tabela 22, a seguir:

**Tabela 22** Medidas da eficiência do CATE (%) para o ajuste do novo modelo de primeira ordem

Variáveis			Variáveis codificadas			
A (W1)	B(W2)	C(W3)	X1	X2	X3	y
3,408	5,584	1,138	-1	-1	-1	77,99
5,408	5,584	1138	1	-1	-1	78,02
3,408	7,584	1,138	-1	1	-1	78,99
5408	7,584	1,138	1	1	-1	79,98
3,408	5,584	1,258	-1	-1	1	89,05
5,408	5,584	1,258	1	-1	1	90,07
3,408	7,584	1,258	-1	1	1	92,27
5,408	7,584	1,258	1	1	1	92,78
4,408	6,584	1,198	0	0	0	93,66
4,408	6,584	1,198	0	0	0	93,87
4,408	6,584	1,198	0	0	0	92,78
4,408	6,584	1,198	0	0	0	92,24
4,408	6,584	1,198	0	0	0	92,58
4,408	6,584	1,198	0	0	0	92,67

O modelo de regressão  $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon$ , foi ajustado pelo método dos mínimos quadrados, resultando os seguintes coeficientes de regressão:

$$\hat{y} = 88,4 + 0,32 x_1 + 1,11 x_2 + 6,15 x_3$$

Novamente o experimento foi planejado de modo que seis observações foram coletadas no ponto (0,0), foi possível avaliar a adequação do modelo, pelo teste de falta de ajuste.

A análise de variância foi realizada para a avaliação da significância da regressão e falta de ajuste, apresentados na Tabela 23, a seguir:

**Tabela 23** Análise de variância

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fo	p-valor	
Regressão	313,150	3	104,383	4,60	0,029	
Residual	226,970	10	22,697			
(Falta de ajuste)	224,880		5	44,976	107,09	0,000
(Erro puro)	2,100		5	0,420		
Total	540,120	13				

Para a falta de ajuste foi obtido o valor  $p\text{-valor} = 0,000 < 0,05$  (nível de significância), foi encontrada uma indicação de que o modelo não se ajusta bem aos dados coletados, ou seja, a hipótese  $H_0$  é rejeitada. A falta de ajuste poderia estar indicando que as proximidades do

ótimo haviam sido alcançadas e pode-se passar para a próxima etapa do método de máxima inclinação ascendente que é o ajuste e interpolação do modelo de segunda ordem.

### 3.3.3 Ajustar o modelo de segunda ordem

Como os dados coletados não eram suficientes para o ajuste do modelo de segunda ordem, foram realizados experimentos adicionais, chamados de pontos axiais.

Pontos axiais são  $(+\alpha, 0, 0)$ ,  $(-\alpha, 0, 0)$ ,  $(0, +\alpha, 0)$ ,  $(0, -\alpha, 0)$ ,  $(0, 0, \alpha)$  e  $(0, 0, -\alpha)$ , obtido da equação 2.13,  $\alpha = (2^3)^{1/4} = 1,682$ .

É importante destacar que as seis observações adicionais foram coletadas em um pequeno intervalo de tempo logo após a obtenção das quatorze observações mostradas anteriormente.

Os dados coletados na simulação estão sumarizados na tabela 24

**Tabela 24** Medidas da eficiência do CATE para o ajuste do modelo de segunda ordem

Variáveis			Variáveis codificadas			
A (W1)	B(W2)	C(W3)	X1	X2	X3	y
3,408	5,584	1,138	-1	-1	-1	77,99
5,408	5,584	1138	1	-1	-1	78,02
3,408	7,584	1,138	-1	1	-1	78,99
5408	7,584	1,138	1	1	-1	79,98
3,408	5,584	1,258	-1	-1	1	89,05
5,408	5,584	1,258	1	-1	1	90,07
3,408	7,584	1,258	-1	1	1	92,27
5,408	7,584	1,258	1	1	1	92,78
4,408	6,584	1,198	0	0	0	93,66
4,408	6,584	1,198	0	0	0	93,87
4,408	6,584	1,198	0	0	0	92,78
4,408	6,584	1,198	0	0	0	92,24
4,408	6,584	1,198	0	0	0	92,58
4,408	6,584	1,198	0	0	0	92,67
6,090	6,584	1,198	1,682	0	0	82,81
2,726	6,584	1,198	-1,682	0	0	85,66
4,408	8,266	1,198	0	1,682	0	88,01
4,408	4,902	1,198	0	-1,682	0	84,37
4,408	6,584	1,299	0	0	1,682	96,27
4,408	6,584	1,097	0	0	-1,682	76,07

O modelo de regressão  $Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \varepsilon$ , foi ajustado pelo método dos mínimos quadrados, resultando o seguinte modelo de segunda ordem ajustado aos dados:

$$\hat{y} = 92,973 - 0,164 x_1 + 1,099 x_2 + 6,089 x_3 - 3,126 x_1^2 - 2,435 x_2^2 - 2,442 x_3^2 + 0,056 x_1 x_2 + 0,064 x_1 x_3 + 0,371 x_2 x_3$$

Novamente o experimento foi planejado de modo que seis observações foram coletadas no ponto (0,0), foi possível avaliar a adequação do modelo, pelo teste de falta de ajuste.

A análise de variância está sumarizada na tabela 25, a seguir:

**Tabela 25** Análise de variância

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fo	p-valor	
Regressão	786,261	9	87,362	123,78	0,000	
Residual	7,058	10	0,706			
(Falta de ajuste)	4,961		5	0,992	2,37	0,183
(Erro puro)	2,097		5	0,419		
Total	793,319	19				

Como a análise de resíduos não revelou inadequações do modelo, no teste de falta de ajuste foi obtido p-valor = 0,183 > 0,05 e no teste da significância da regressão foi obtido p-valor = 0,000 < 0,05, com isto se conclui que o modelo de segunda ordem é uma aproximação adequada para a superfície de resposta.

A seguir é realizada a análise canônica, escrevendo o modelo sob a forma matricial, conforme a equação 2.18:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \mathbf{x}'\mathbf{b} + \mathbf{x}'\mathbf{B}\mathbf{x}$$

$$\hat{\beta}_0 = 92,973$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,164 \\ 1,099 \\ 6,089 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -3,126 & 0,056/2 & 0,064/2 \\ 0,056/2 & -2,435 & 0,371/2 \\ 0,064/2 & 0,371/2 & -2,442 \end{bmatrix}$ , utilizando a equação (2.20), temos que o ponto estacionário.

$\mathbf{x}_0 = -0,5\mathbf{B}^{-1}\mathbf{b}$ , porem, a matriz inversa de uma matriz  $\mathbf{B}$  x matriz  $\mathbf{B} = \mathbf{I}$  (matriz identidade).

$$\mathbf{B}^{-1} = \begin{bmatrix} -0,319979 & -0,004022 & -0,000449 \\ -0,004022 & -0,413115 & -0,031429 \\ -0,004498 & -0,031390 & -0,411887 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{x}_0 = -0,5\mathbf{B}^{-1}\mathbf{b} = -0,5 \begin{bmatrix} -0,319979 & -0,004022 & -0,000449 \\ -0,004022 & -0,413115 & -0,031429 \\ -0,004498 & -0,031390 & -0,411887 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,164 \\ 1,099 \\ 6,089 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0227 \\ 0,3222 \\ 1,2708 \end{bmatrix}$$

Utilizando a equação (3.1), o ponto estacionário é expresso em termos dos fatores originais  $w_1, w_2$  e  $w_3$ :

$$-0,0227 = \frac{w_1 - 4,408}{1} \quad w_1 = 4,385 \text{ horas disponível para a "janela de tratamento"}$$

$$0,3222 = \frac{w_2 - 6,584}{1} \quad w_2 = 6,906 \text{ caminhões}$$

$$1,2708 = \frac{w_3 - 1,198}{0,06} \quad w_3 = 1,2743 \text{ segundos., para o tempo médio de processamento}$$

Resultando a seguinte eficiência, obtida da fórmula (2.21):

$$\hat{y}_0 = 92,973 + 0,5 \begin{bmatrix} -0,0227 & 0,3222 & 1,2708 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,164 \\ 1,099 \\ 6,089 \end{bmatrix} = 97,08 \%$$

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho analisou oito modelos de cenários para buscar um centro de tratamento de encomendas robusto. Robustez da cadeia de suprimentos não é um conceito perfeitamente definido e acordado universalmente na literatura. Este trabalho trouxe uma contribuição significativa para esta área. O trabalho mostra como os experimentos baseados no método Taguchi podem ser integrados com simulação computacional para estimar a robustez da cadeia de suprimentos.

Este trabalho detalhou primeiramente a abordagem inovadora, para melhorar uma cadeia de suprimentos, pois esta abordagem lida com as variações inesperadas, ou seja, a idéia desta abordagem é a de criar uma cadeia de suprimentos mais insensível a variações inesperadas-mais robusta.

A abordagem inovadora, para a estimativa da robustez proposta por Vieira *et al* (2009) combina a utilização de simulação discreta, matrizes ortogonais, DOE- (*Design of Experiments* )- delineamentos de experimentos, baseados em projeto robusto de Taguchi, para estimar a robustez da cadeia de suprimentos.

Ao utilizar a abordagem de parâmetros robustos de Taguchi, cada parâmetro incontrollável (parâmetro que pode sofrer variação inesperada ou ruídos) é avaliado individualmente, e o índice de robustez é calculado como uma combinação linear de cada um dos diferentes parâmetros, de acordo com cada importância dos parâmetros para os “tomadores de decisão” da cadeia de suprimentos, esta importância é avaliada através da atribuição de pesos para cada parâmetro.

A abordagem inovadora utilizada neste trabalho pode ser aplicada a diferentes cadeias de suprimentos, através da simulação de experimentos, o “tomador de decisão” é capaz de estimar as diferentes respostas a várias novas situações que podem ocorrer com o sistema. Entretanto, infelizmente o resultado desta abordagem apresentou alguns problemas em relação aos cálculos relativos aos erros, não ficando muito claro se o cenário 6 ou cenário 8 era o mais robusto, apesar do cenário 8 possuir o maior índice de robustez.

Na intenção de confirmar ou rejeitar os resultados obtidos utilizou-se o segundo método de análise (Razão sinal-ruído), o qual deixou claro que o cenário 6 era o cenário mais robusto, onde a triagem das encomendas começa uma hora mais cedo, o número de caminhões se manteve o mesmo que o cenário original (cenário 1) e deve-se buscar uma melhora no TMP, de 1,29 segundos para 1,23 segundos. Por último, na intenção de refinar os dados do cenário 6 aplicou-se a ferramenta: Metodologia superfície de resposta, onde a “janela de tratamento” foi

reduzida para 4,4 h, o número de caminhões foi aumentado em uma unidade e o TMP foi aumentado para 1, 27 segundos. Esta pesquisa mostrou que além de obter um projeto robusto com o uso das ferramentas do método Taguchi e a abordagem inovadora, também se podem maximizar estes resultados com o uso da ferramenta superfície de resposta.

Estes resultados são melhores visualizados quando do preenchimento do quadro da Figura 3, a seguir:

FERRAMENTAS	Cenário mais robusto	Parâmetros controláveis			EFICIÊNCIA (Y)
		A- (horas) "janela de tratamento"	B- (unidade) nº de caminhões	C- (segundos) nível de automação TMP	
<b>1- Método Taguchi (matrizes ortogonais)</b>	8	5	7	1,23	95,32 (média)
<b>2- Método Taguchi (razão sinal-ruído)</b>	6	5	6	1,23	95,12
<b>3- Superfície de resposta</b>	Refinamento do cenário 6	4,4	7	1,27	97,08
	<b>Cenário Original (cenário 1)</b>	4	6	1,29	79,74 (média)

Figura 3 Detalhamento dos resultados obtidos

Através do quadro acima se conclui que, o uso de apenas uma ferramenta não trás uma resposta muito conclusiva, e quando usamos as ferramentas do método Taguchi aliada com a ferramenta superfície de resposta o resultado realmente é otimizado, ou seja, a eficiência inicial era de 79,74% e após o uso da ferramenta superfície de resposta esta eficiência subiu para 97,08%.

Quanto à metodologia da pesquisa, os dados colhidos em campo atenderam plenamente as necessidades deste trabalho.

#### 4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Aplicação da metodologia proposta por Vieira *et al.* (2009), para grandes cadeias de suprimentos.

Aplicação da ferramenta razão sinal ruído, de Taguchi, considerando as interações entre os fatores.

Análise da robustez com base em diferentes métodos de previsão, políticas de controle de estoque, métodos de planejamento e estrutura de distribuição, para fazer uma cadeia de suprimentos mais robusta em termos de “efeito chicote”, efeito *bullwhip*.

## REFERÊNCIAS

BARD, F. J., Desilva, Anura e Bergevin, André. **A Simulation Analysis of Advanced Concepts for Semi-automated Mail Processing**. The Journal of the Operation Reserch Society, Vol. 42, N° 12 ,Dezembro de 1991a, pp. 1071-1086.

BARD, F. J., Desilva, Anura e Bergevin, André. **Evaluating Simulation Software for postal Service Use: Techique Versus Perception**. IEEE Transaction on Engineering Management, Vol.44, N° 1 Fevereiro de 1997b.

BEAMON, Benita M. **Measururing supply chain performance**. International journal of Operations & Production Management, Vol. 19, N° 3, 1999.

BUCKTHOUGHT, Karl, Nagi, M, Wong, V., M.T.. **A Simulation model for scheduling mecahanized postal plants**. Annual Simulation Symposium, pg. 61-64, 1978

CHAN, F.T.S. e Chan, H. K. **Simulation modeling for comparative evaluation of supply chain management strategies**, Int. Adv. Manuf Techol 25:998-1006, 2005.

CHAN, F. T. S., Qi, H.J, Chan, H. Q., Lau, H. C. W., Ip, R. W. L., 2003. A conceptual model of performance measurement for supply chains. Management Decision. 41/7, 635-642.

CHOPRA, Sunil; Meindl, Peter. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: estratégia, planejamento e operação**. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

DALL'AGNOL,W.J.: **Aplicação de Simulação Computacional na Avaliação de Desempenho da Cadeia Produtiva através da Colaboração e Melhorias dos Processos Logísticos**.. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas, Área de Concentração: Gerência de Produção e Logística- Departamento de pós-graduação. Pontificia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2005.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. : **Minidicionário Aurélio da Língua Portuguesa**, 3ª ed., Ed. Nova Fronteira, 1993.

GENIN, P.; Lamouri, S. e Thomas A.: **Multi-facilities tactical planning robustness with experimental design. Production Planning & Control**. Vol.19. Nº 2, 171-182, March 2008.

GIL, A.C.:**Como elaborar Projetos de Pesquisa**, 4ª edição Editora Atlas 2002.

GLOBAL SUPPLY CHAIN FORUM, (2008). Disponível em :

<http://www.fisher.osu.edu/centers/scm/about-the-forum> Acesso em 06 de Agosto de 2008.

HUNT, K. L., Madigan Jr, E.F. e Phelps, R. **A Simulation Success Stories: Business Process Reengineering**. Winter Simulation Conference, 1997.

JOAQUIM, E.D **Análise de um novo centro cirúrgico para o hospital universitário Cajuru: Estudo de caso baseado em simulação computacional**.. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas, Área de concentração: Gerência de Produção e Logística – Departamento de Pós-Graduação. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba 2005.

LARSEN N.E., **Simulation- A Key Tool to Accelerate And Confidence to Postal Network Configuration**. (2003). Disponível em:<http://www.informs-sim.org/wsc03papers/201.pdf> .Acesso em 29 de Abril de 2008.

LAW, A. M. e Kelton, W.D. **Simulation Modeling and Analysis**, 3ª Ed., McGraw-Hill. ,2000.

LIMA, Luís H. **Uma abordagem híbrida do uso da técnica Taguchi e resposta de superfície para projeto ótimo robusto de cadeias de suprimentos via simulação discreta**. Tese de Mestrado em Engenharia de Produção-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUC- Curitiba 2008.

MAHAPATRA, S.S., PATNAIK, A. e SATAPATHY, A. **Taguchi method applied to parametric appraisal of erosion behavior of GF-reinforced polyester composites.** ScienceDirect, pg 214-222, 2008

MENTZER, J.T., DeWitt, William, Keebler, Min, Soonhong, Nix, Nancy W., Smith, Carlo D. e Zacharia, Zach G.: **DEFING SUPPLY CHAIN MANAGEMENT.** Journal of Business Logistics, Vol.22, nº 2, 2001

MICHAELIS, **Moderno Dicionário da Língua Portuguesa**, Editora Melhoramentos, 2008.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments.** 5th ed. New York: John Wiley, 2001

PARK, Sung H. **Robust Design and Analysis for Quality Engineering**, 1ª edição, Editora Chapman &Haal ,1996.

PRADO, D.; **Usando Arena em Simulação** : Belo Horizonte , MG: Editora de Desenvolvimento Gerencial., 2004.

ROY, Ranjiit K. **Desing of experiments using the TAGUCHI approach: 16 steps to product and process improvement.** Wiley- Interscience, New York, 2001

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

SHANG, J.S. **Robust design and optimization of material handling in an FMS.** INT. J. PROD. RES. 1995, vol. 33, nº 9, 2437-2454, USA

SHANG, J.S. LI, S., TADIKAMALLA, Pandu. **Operational design of a supply chain system using the Taguchi method, response methodology, simulation, and optimization** INT. J. PROD. RES. 2004, vol. 42, nº 18, 3823-3849, USA

SILVA, Reinaldo O. da. **Teorias da Administração.** São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2001.

SOARES, L.G : **Modelagem e Simulação Discreta de Sistemas** : Editora Campus., 1992.

STANEVICIUS, A.: Using **Simulation to Support Technology Investment Decisions at The United States Postal Service Automation Associates**. (2004). Disponível em: [http://www.automationassociates.net/cs\\_USPS.asp](http://www.automationassociates.net/cs_USPS.asp). Acesso em 29 de Abril de 2008.

TAGUCHI, Genichi; CHOWDHURY, Subir; WU, Yuin. **TAGUCHI'S Quality Engineering Handbook**. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc. 2005.

TOLEDO, J. C., AZEKA, F. e AMARAL, D. C. **Método Taguchi** (2002). Disponível em [http://paginas.terra.com.br/negocios/processos2002/metodo\\_taguchi.htm](http://paginas.terra.com.br/negocios/processos2002/metodo_taguchi.htm) Acesso em 29 de Julho de 2008.

TOMASI, Neusi Garcia Segura; YAMAMOTO, Rita Miako. **Metodologia da pesquisa em saúde: fundamentos essenciais**. Curitiba:, 1999.

VIEIRA, Guilherme, E. e LEMOS, Reynaldo: **Computer simulation in a large mailing company: In search for a robust configuration**. Publicado na 2009 IEEE International Conference on Service Operations Logistics and Informatics. Chicago, IL, USA, julho 2009a

VIEIRA, Guilherme, E.. e LEMOS, Reynaldo: **Understanding supply chain robustness**. Publicado na 2009 IEEE International Conference on Service Operations Logistics and Informatics. Chicago, IL, USA, julho 2009b

Vieira, G. E., Joines, J. A., and Thoney, K. **A new methodology for the design of robust supply chains based on orthogonal arrays DOE and computer simulation**. Submetido ao XII Symposium on Production Management, Logistics, and International Operations (SIMPOI) 2009.

VRGOE, M., Cerie, V., **Investigation and Design of Parcel Sorting Systems in Postal Centres by Simulation**. North-Holland Computers in industry 10, p. 137-145, 1988.

WANG, Qian., Batta Rajan e Szczerba, R.J. **Sequencing the processing of incoming mail to match na outbound truck delivery schedule.** Computers & Operation Research 32, pp 1777-1791, 2005..

WERT, S.D, BARD, J.F., DESILVA, ANURA e FEO, T.A., **A Simulation Analysis of Advanced Concepts for Semi-automated Mail Processing.** Operational Research Society Ltd, 1991. Disponível em <[http://links.jstor.org/sici?sici=0160-5682\(199112\)42%3A12%3C1071%3AASAOAC%3E2.0.CO%3B2-Q](http://links.jstor.org/sici?sici=0160-5682(199112)42%3A12%3C1071%3AASAOAC%3E2.0.CO%3B2-Q)>. Acesso em 13 dez 2006.

XIANGTONG Qi<sup>a</sup>, **Generating labor requirements and roster for mail handlers using simulation and optimization-**(2005). Disponível em [www.sciencedirect.com-](http://www.sciencedirect.com/science@direct-)

Disponível [http://www.me.utexas.edu/~bard/Bard\\_Papers/Sim&Opt%20Labor%20\(COR\).pdf](http://www.me.utexas.edu/~bard/Bard_Papers/Sim&Opt%20Labor%20(COR).pdf).

Acesso em 29 de Abril de 2008.

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

## APÊNDICE A

Uma das metas anuais de uma indústria, gerada a partir das exigências do mercado e da necessidade de sobrevivência da empresa, consistia em aumentar de 75% para 85%, até o final do ano considerado, o teor médio de pureza de uma substância química por ela fabricada. Para que o teor de pureza pudesse ser maximizado, os técnicos da empresa decidiram utilizar a metodologia superfície de resposta.

Após relacionar os fatores que possam exercer efeitos significativos sobre a variável resposta de interesse: os técnicos chegaram a conclusão, através de um experimento fatorial  $2^k$ , que a pressão e a temperatura influenciavam de modo significativo o teor de pureza da substância química.

Foi realizado um experimento mais detalhado, envolvendo apenas os fatores temperatura e pressão do reator.

Condições de operação do processo no início do estudo:

Pressão = 15 atm.

Temperatura = 70° C

Teor de pureza próximo de 75%

Devido aos técnicos acreditarem que estavam distantes do ponto ótimo eles decidiram ajustar um modelo de primeira ordem e aplicar o método de máxima inclinação ascendente (maximizar o teor de pureza) para o detalhamento do experimento.

Os técnicos também decidiram que a região de exploração para a adequação do modelo era o intervalo (13, 17) atm e (65, 75)°C, pois eles acreditavam que a variação de 2 atm na pressão e 5°C para a temperatura seria capaz de provocar alterações significativas no teor da pureza.

Com objetivo de simplificar os cálculos e manter a mesma notação utilizada em experimentos  $2^k$ , os fatores  $w_1$  e  $w_2$  foram codificados de forma que o intervalo de variação de cada um deles se transformasse no intervalo (-1, 1), ou seja, -1 para o nível mais baixo do fator e 1 para o nível mais alto do fator, conforme mostrados na tabela 6.

Os fatores sob a forma codificada, representados por  $x_1$  e  $x_2$ , foram definidos através da equação (2.8) definidos pelas seguintes expressões:

$$x_1 = \frac{w_1 - (17+13)/2}{(17-13)/2} = \frac{w_1 - 15}{2} \quad \text{e} \quad x_2 = \frac{w_2 - (75+65)/2}{(75-65)/2} = \frac{w_2 - 70}{5}$$

O experimento realizado consistiu em coletar uma observação do teor de pureza da substância química em cada uma das condições (-1, -1), (-1, 1), (1, -1) e (1, 1) e cinco observações no ponto (0, 0).

As cinco observações no ponto (0, 0) foram realizadas para analisar a variabilidade devido ao erro e também para avaliar a adequação do modelo de primeira ordem.

Os dados coletados no estudo realizado pela equipe de técnicos estão apresentados na tabela A1

**Tabela A1** Medidas do teor de pureza (%) para o ajuste do modelo de primeira ordem.

Variáveis		Variáveis Codificadas		Resposta
Pressão ( $w_1$ ) (atm)	Temp. ( $w_2$ )	$x_1$	$x_2$	Teor de Pureza (y)
13	65	-1	-1	74,6
13	75	-1	1	74,9
17	65	1	-1	75,3
17	75	1	1	75,6
15	70	0	0	75,1
15	70	0	0	75,2
15	70	0	0	75,3
15	70	0	0	75,0
15	70	0	0	75,2

Foi ajustado aos dados da Tabela A1, pelo método de mínimos quadrados. Segundo Montgomery (2001), a equação (2.5) pode ser escrita em notação matricial, ou seja:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (\text{A.1})$$

Onde:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & x_{nk} \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}$$

$$\beta = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}' \cdot \mathbf{Y}, \text{ sendo } \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & +1 \\ 1 & +1 & -1 \\ 1 & +1 & +1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 74,6 \\ 74,9 \\ 75,3 \\ 75,6 \\ 75,1 \\ 75,2 \\ 75,3 \\ 75 \\ 75,2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X}' = \begin{bmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \\ -1 & -1 & +1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & +1 & -1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ onde } \mathbf{X}' \text{ é a matriz transposta de } \mathbf{X}$$

$$\mathbf{X}'\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 9 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} = \text{matriz inversa} = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X}'\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 676,2 \\ 1,4 \\ 0,6 \end{bmatrix} \quad \beta = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}' \cdot \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 676,2 \\ 1,4 \\ 0,6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 75,13 \\ 0,35 \\ 0,15 \end{bmatrix}$$

Sendo:  $\beta_0 = 75,13$ ,  $\beta_1 = 0,35$  e  $\beta_2 = 0,15$

O ajuste tem a seguinte equação:  $\hat{y} = 75,13 + 0,35x_1 + 0,15x_2$

Como o experimento foi planejado de modo que cinco observações fossem coletadas no ponto (0,0), foi possível avaliar a adequação do modelo, pelo teste de falta de ajuste.

A análise de variância foi realizada para a avaliação da significância da regressão, sendo que a soma dos quadrados será expressa pelas fórmulas A.2, A.3, A.4, A.5, e A.6, a

fórmula A.2 refere-se a regressão, a fórmula A.3 refere-se a residual, a A.4 refere-se a falta de ajuste, a A.5 ao Erro puro e a A.6 é a referente a regressão total:

$$S_{reg} = \sum (\hat{y} - \bar{y})^2, \text{ sendo } \bar{y} = \text{a média dos valores de } y \text{ (variável dependente) e } \hat{y}, \text{ obtido através do ajuste da equação (2.5) substituindo os valores das variáveis codificadas } x_1 \text{ e } x_2 \quad (\text{A.2})$$

$$S_{res} = \sum (\hat{y} - y)^2 \quad (\text{A.3})$$

$$S_{fa} = \sum S_{res} - \sum \text{erro} \quad (\text{A.4})$$

$$S_{erro} = \sum (y - \bar{y}_p)^2, \text{ sendo } \bar{y}_p = y \text{ médio do erro puro } (x_1 \text{ e } x_2 = 0) \quad (\text{A.5})$$

$$S_{total} = S_{reg} + S_{res}. \quad (\text{A.6})$$

Os graus de liberdade serão os seguintes:

$$\text{Regressão} = \text{número de fatores, ou seja, } GL_{reg} = k \quad (\text{A.7})$$

$$\text{Residual} = n - k - 1 \quad (\text{A.8})$$

$$\text{Falta de ajuste} = k \quad (\text{A.9})$$

$$\text{Erro puro} = n - 2k - 1 \quad (\text{A.10})$$

Quadrado Médio reg (QMREG) = soma dos quadrados da rejeição/ grau de liberdade da regressão. (A.11)

Quadrado médio res (QMRES) = soma dos quadrados do resíduo / grau de liberdade do resíduo (A.12)

$$F_o = \text{QMREG} / \text{QMRES}, \text{ para a regressão} \quad (\text{A.13})$$

$$F_o = \text{QMFA} / \text{QMErro Puro}, \text{ para a falta de ajuste} \quad (\text{A.14})$$

p-valor = probabilidade de ocorrência do valor, retirado do software EXCEL, na tabela DISTF, entrando com os valores de  $F_o$ , o grau de liberdade do numerador e o grau de liberdade do denominador.

Os dados desta análise estão sumarizados na Tabela A2 a seguir, considerando as seguintes hipóteses para a falta de ajuste:

$H_0: \hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon$ , se ajusta bem aos dados do modelo linear

$H_1: \hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon$ , não se ajusta bem aos dados do modelo linear.

**Tabela A2** Análise da variância

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fo	p-valor
Regressão	0,580	2	0,290	29,00	0,001
Residual	0,060	6	0,010		
(Falta de ajuste)	0,008		2	0,31	0,751
(Erro puro)	0,052		4		
Total	0,640	8			

Para a falta de ajuste foi obtido o valor p-valor = 0,751 > 0,05 (nível de significância), o modelo se ajusta bem aos dados coletados, ou seja, a hipótese  $H_0$  é aceita.

Para a regressão foi obtido p-valor = 0,001 < 0,005, ou seja, a regressão é significativa, as variáveis temperatura e pressão são influentes.

Como o modelo de primeira ordem é adequado, os técnicos da indústria passaram às etapas seguintes do método de máxima inclinação ascendente.

a)- Foi escolhido o valor da alteração que será sofrida pelo fator pressão ( $w_1$ ), a partir do centro do intervalo de variação deste fator (15 atm).

$$\Delta w_i = 1 \text{ atm}$$

b)- O acréscimo  $\Delta w_i$  sob a forma codificada  $\Delta x_1$ , obtido da equação (2.6):

$$\Delta x_1 = (\Delta w_i) / A1/2 = \frac{1}{(17-13)/2} = \frac{1}{2} = 0,50$$

c)- O valor da alteração para o fator X2,  $\Delta x_2$ , da equação (2.7):

$$\Delta x_2 = \frac{\beta_2}{\beta_1 / \Delta x_1} = \frac{0,15}{0,35 / 0,5} = 0,21$$

d)- O valor da alteração para  $w_2$ ,  $\Delta x_1$ , da equação (2.6),

$$\Delta w_2 = (\Delta x_2) / A2/2 = 0,214 \times 10 = 1,07 \text{ -/+ 1}$$

2

A nova condição de operação foi definida como: (15 +1, 70 +1) = (16, 71)

Os valores obtidos para o teor da pureza nas sucessivas iterações e estão apresentados na tabela 8.

Observando os dados na Tabela A3, nota-se que até o oitavo passo o rendimento vai aumentando e a partir daí o rendimento começa a decair, portanto a adequação do modelo de primeira ordem será em torno dos pontos 23 e 78. A região onde os dados foram coletados foi delimitada pelos intervalos (21, 25) atm e (73, 83)° C. Os técnicos mantiveram a mesma

amplitude para as variações, pois eles acreditavam que variações de ordem de 2 atm e 5 °C, a partir do ponto central eram suficientes para provocar variações significativas no teor de pureza e ao mesmo tempo gerariam uma pequena região, de forma que pudesse ser bem representado pelo modelo de primeira ordem.

**Tabela A3** Medidas do teor de pureza obtidas na direção de máxima inclinação ascendente.

Passos	Variáveis		Variáveis Codificadas		Resposta
	$x_1$	$x_2$	$w_1$	$w_2$	Teor de Pureza (y) (%)
Origem	0	0	15	70	y
$\Delta$	0,50	0,21	1	1	
Origem + 1 $\Delta$	0,50	0,21	16	71	75,9
Origem + 2 $\Delta$	1,00	0,42	17	72	76,5
Origem + 3 $\Delta$	1,50	0,63	18	73	77,3
Origem + 4 $\Delta$	2,00	0,84	19	74	79,0
Origem + 5 $\Delta$	2,50	1,05	20	75	81,4
Origem + 6 $\Delta$	3,00	1,26	21	76	84,2
Origem + 7 $\Delta$	3,50	1,47	22	77	85,4
Origem + 8 $\Delta$	4,00	1,68	<b>23</b>	<b>78</b>	<b>86,1</b>
Origem + 9 $\Delta$	4,50	1,89	24	79	84,5

Novamente os fatores  $x_1$  e  $x_2$  foram codificados para o intervalo de variação (-1, 1), e a região da coleta dos dados foi delimitada pelos intervalos (21, 25) atm e (73, 83) °C, onde:

$$x_1 = \frac{w_1 - (25+21)/2}{(25-21)/2} = \frac{w_1 - 23}{2} \quad \text{e} \quad x_2 = \frac{w_2 - (83+73)/2}{(83-73)/2} = \frac{w_2 - 78}{5} \quad (\text{A15})$$

Novamente através da simulação computacional, foi coletado o teor de pureza (y) para todas as condições (-1,-1), (-1, +1), (+1,-1) e (+1, +1) e cinco observações no ponto (0,0).

Os dados coletados pelos técnicos estão descritos na Tabela A4, a seguir:

**Tabela A4** Medidas do teor de pureza (%) obtidas no experimento para o ajuste do novo modelo de primeira ordem.

Variáveis		Variáveis Codificadas		Resposta
Pressão ( $w_1$ ) (atm)	Temp.( $w_2$ )	$x_1$	$x_2$	Teor de Pureza (y)
21	73	-1	-1	82,0
21	83	-1	1	82,6
25	73	1	-1	83,6
25	83	1	1	85,2
23	78	0	0	85,7
23	78	0	0	86,1
23	78	0	0	85,8
23	78	0	0	85,5
23	78	0	0	85,6

O modelo de regressão  $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon$ , foi ajustado pelo método dos mínimos quadrados, resultando o seguinte modelo de primeira ordem ajustado:

$$\hat{y} = 84,68 + 1,051 x_1 + 0,55 x_2$$

Como o experimento foi planejado de modo que cinco observações foram coletadas no ponto (0,0), foi possível avaliar a adequação do modelo, pelo teste de falta de ajuste.

A análise de variância foi realizada para a avaliação da significância da regressão e também para a falta de ajuste, os resultados são apresentados na Tabela A5, a seguir:

**Tabela A5** Análise de variância

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fo	p-valor
Regressão	5,620	2	2,810	1,28	0,344
Residual	13,160	6	2,193		
(Falta de ajuste)	12,940	2	6,470	122,08	0,000
(Erro puro)	0,212	4	0,053		
Total	18,780	8			

Como para o teste de falta de ajuste foi obtido  $p\text{-valor} = 0,000 < 0,005$ , foi encontrada uma indicação de que o modelo  $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon$ , não se ajustava bem aos dados coletados nesta região do estudo, isto implica que a região do ótimo foi alcançada e que se deve passar para a próxima etapa do método de máxima inclinação ascendente, o ajuste e interpolação do modelo de segunda ordem.

Obtido da equação 2.14,  $Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2$ , pode-se transformar o modelo de segunda ordem em um modelo de primeira ordem, apenas para

facilitar os cálculos, conforme a equação (2.15),  $Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \varepsilon$ , e os pontos adicionais chamados de pontos axiais ( $2^k = 2 \cdot 2 = 4$ ) são  $(+\alpha, 0)$ ,  $(-\alpha, 0)$ ,  $(0, +\alpha)$  e  $(-\alpha, 0)$ , da equação 2.13,  $\alpha = (n^\circ \text{ de tratamentos})^{1/4} = (2^2)^{1/4} = 1,414$ .

É importante destacar que as quatro observações adicionais foram coletadas em um pequeno intervalo de tempo logo após a obtenção das nove observações mostradas anteriormente.

Os dados coletados estão sumarizados na Tabela A6, a seguir:

**Tabela A6** Medidas do teor de pureza obtidas para o ajuste do modelo de segunda ordem.

Variáveis		Variáveis Codificadas					Resposta
Pressão ( $w_1$ ) (atm)	Temp. ( $w_2$ )	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	Teor de Pureza (y) (%)
21	73	-1	-1	1	1	1	82,0
21	83	-1	1	1	1	-1	82,6
25	73	1	-1	1	1	-1	83,6
25	83	1	1	1	1	1	85,2
23	78	0	0	0	0	0	85,7
23	78	0	0	0	0	0	86,1
23	78	0	0	0	0	0	85,8
23	78	0	0	0	0	0	85,5
23	78	0	0	0	0	0	85,6
25,83	78	1,414	0	2	0	0	84,0
20,17	78	-1,414	0	2	0	0	81,0
23	85,07	0	1,414	0	2	0	84,1
23	70,93	0	-1,414	0	2	0	82,5

O modelo de regressão  $Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon$ , foi ajustado pelo método dos mínimos quadrados, resultando o seguinte modelo de segunda ordem ajustado aos dados:

$$\hat{y} = 85,740 + 1,055 x_1 + 0,558 x_2 - 1,508 x_1^2 - 1,108 x_2^2 + 0,250 x_1 x_2$$

Como o experimento foi planejado de modo que cinco observações foram coletadas no ponto (0,0), foi possível avaliar a adequação do modelo, pelo teste de falta de ajuste.

A análise de variância foi realizada para a avaliação da significância da regressão, e também para a falta de ajuste, apresentados na Tabela A7, a seguir:

**Tabela A7** Análise de variância

Fonte de Variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fo	p-valor	
Regressão	33,340	5	6,668	75,61	0,000	
Residual	0,617	7	0,088			
(Falta de ajuste)	0,405		3	0,135	2,55	0,194
(Erro puro)	0,212		4	0,053		
Total	33,957	12				

Como a análise de resíduos não revelou inadequações do modelo, no teste de falta de ajuste foi obtido p-valor = 0,194 > 0,05 e no teste da significância da regressão foi obtido p-valor = 0,000 < 0,05, com estes resultados os técnicos concluíram que o modelo de segunda ordem era uma aproximação adequada para a superfície de resposta.

A seguir os técnicos realizaram a análise canônica com o objetivo de determinar a condição ótima de operação do processo.

O modelo de segunda ordem

$$\hat{y} = 85,740 + 1,055 x_1 + 0,558 x_2 - 1,508 x_1^2 - 1,108 x_2^2 + 0,250 x_1 x_2, \text{ pode ser escrito}$$

sob a forma matricial:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \mathbf{x}'\mathbf{b} + \mathbf{x}'\mathbf{B}\mathbf{x}$$

Onde:

$$\hat{\beta}_0 = 85,740$$

Obtido da equação 2.19,

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,055 \\ 0,558 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -1,508 & 0,125 \\ 0,125 & -1,108 \end{bmatrix}$$

O ponto estacionário é obtido da equação 2.20, a seguir:

$$x_0 = -0,5 \begin{bmatrix} -1,508 & 0,125 \\ 0,125 & -1,108 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0,374 \\ 0,294 \end{bmatrix}$$

Obtido da equação (2.36), o ponto estacionário é expresso em termos dos fatores originais  $w_1$  e  $w_2$  :

$$0,374 = (w_1 - 23) / 2 = w_1 = 23,748 \text{ aprox. } 24 \text{ atm}$$

$$0,294 = (w_2 - 78) / 5 = w_2 = 79,47 \text{ aprox. } 80^\circ\text{C}$$

Para o cálculo da resposta predita no ponto estacionário, utiliza-se a equação (2.21)

$$\hat{y} = 85,740 + 0,5 \begin{bmatrix} 0,374 & 0,294 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1,055 \\ 0,558 \end{bmatrix} = 86,0194 = 86 \%$$

A análise do ponto estacionário corresponde a um ponto de máximo do teor de pureza (86%), o qual ocorre nas proximidades da condição de operação de 24 atm e 80°C.