

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ARARAQUARA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Celso Eliezer Esquetini

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DA EFICÁCIA DE UM POKA-YOKE POR
MEIO DE BALANÇA DE PRECISÃO PARA EVITAR PEÇA
FALTANTE NAS EMBALAGENS DE KITS DE EQUIPAMENTOS
AGRÍCOLAS. UM ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção do Centro Universitário de Araraquara – UNIARA – como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, Área de Concentração: Gestão Estratégica e Operacional da Produção.

Prof. Dr. Jorge Alberto Achcar
Orientador

ARARAQUARA, SP - Brasil
2016

FICHA CATALOGRÁFICA

E81a Esquetini, Celso Eliezer

Análise estatística da eficácia de um Poka-Yoke por meio de balança de precisão para evitar peça faltante nas embalagens de kits de equipamentos agrícolas. Um estudo de caso / Celso Eliezer Esquetini.

Araraquara: UNIARA - Centro Universitário de Araraquara, 2016.
73f.

Dissertação - Mestrado Profissional em Engenharia de Produção
Centro Universitário de Araraquara- UNIARA

Orientador: Prof. Dr. Jorge Alberto Achcar

1. *Poka-yoke*. 2. Balança de precisão. 3. Eficácia.
4. Regressão linear múltipla. 5. Regressão de *Poisson*. I. Título.

CDU62-1

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Esquetini, Celso Eliezer. **Análise Estatística da Eficácia de um Poka-Yoke por meio de Balança de Precisão para Evitar Peça Faltante nas Embalagens de Kits de Equipamentos Agrícolas. Um Estudo de Caso.** 2016. 73f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Centro Universitário de Araraquara, Araraquara-SP.

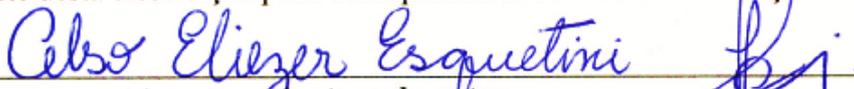
ATESTADO DE AUTORIA E CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Celso Eliezer Esquetini

TÍTULO DO TRABALHO: Análise Estatística da Eficácia de um Poka-Yoke por meio de Balança de Precisão para Evitar Peça Faltante nas Embalagens de Kits de Equipamentos Agrícolas. Um Estudo de Caso

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2016

Conforme LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998, o autor declara ser integralmente responsável pelo conteúdo desta dissertação e concede ao Centro Universitário de Araraquara permissão para reproduzi-la, bem como emprestá-la ou ainda vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a sua autorização.


Nome por extenso e assinatura do autor

Centro Universitário de Araraquara – UNIARA
Rua Carlos Gomes, 1217, Centro. CEP: 14801–340, Araraquara-SP

Email (do autor): celso.esquetini@hotmail.com



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ARARAQUARA - UNIARA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção do Centro Universitário de Araraquara – UNIARA – para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de Concentração: Gestão Estratégica e Operacional da Produção.

NOME DO AUTOR: **CELSO ELIEZER ESQUETINI**

TÍTULO DO TRABALHO:

“ANÁLISE ESTATÍSTICA DA EFICÁCIA DE UM POKA-YOKE POR MEIO DE BALANÇA DE PRECISÃO PARA EVITAR PEÇA FALTANTE NAS EMBALAGENS DE KITS DE EQUIPAMENTOS AGRÍCOLAS. UM ESTUDO DE CASO”

Assinatura do(a) Examinador(a)

Conceito

Aprovado () **Reprovado**

Prof. Dr. Jorge Alberto Achcar (orientador)
Centro Universitário de Araraquara – UNIARA

Aprovado () **Reprovado**

Prof. Dr. Cláudio Luís Piratelli
Centro Universitário de Araraquara – UNIARA

Aprovado () **Reprovado**

Prof. Dr. Fábio Müller Guerrini
Universidade de São Paulo - USP

Versão definitiva revisada pelo(a) orientador(a) em: 07/06/2016

Prof. Dr. Jorge Alberto Achcar (orientador)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer à minha esposa Leonora e aos meus dois filhos menores, Giovani e Larissa, que permitiram a minha ausência dos laços familiares em detrimento de todos os meus esforços em prol da realização desta dissertação de mestrado.

Agradeço imensamente ao Diretor industrial (nome preservado) da empresa, objeto deste estudo de caso que comprou a ideia deste *poka-yoke* desde a apresentação do projeto por intermédio de um simples e-mail.

E não podia deixar de registrar o meu agradecimento ao meu orientador, o professor Doutor Jorge Alberto Achcar, por todo o interesse, dedicação e paciência da sua parte durante todo o acompanhamento e instrução que prestou a este trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas pelo apoio interminável e energia que me deram durante os meus estudos.

Obrigado!

RESUMO

O sucesso de uma indústria está associado à eficácia, qualidade dos produtos e minimização de custos relativos às perdas. Várias técnicas podem ser usadas na detecção de possíveis erros no processo que podem levar a grandes ganhos para a indústria. Uma técnica de grande uso pelos países mais industrializados é introduzida pelo dispositivo *poka-yoke* definido sob o contexto da filosofia *Zero Quality Control* (ZQC). O objetivo desse trabalho é demonstrar a eficiência do *poka-yoke* eletrônico por meio de análises estatísticas dos dados coletados antes e depois do uso de balança de precisão no processo de embalagem de *kit*, o qual compreende a contagem e aferição de peças de tamanhos e quantidades variadas com a garantia da rastreabilidade do pedido. Para verificar os ganhos obtidos pelo uso da técnica *poka-yoke* foram utilizados vários procedimentos estatísticos como a análise de regressão linear múltipla e a análise de regressão de *Poisson*, entre outras. Os resultados mostraram grande redução de peças faltantes ao longo dos três anos de observação deste estudo de caso, especialmente com a eliminação de erros constatada pós-implantação do *poka-yoke* no último ano de análise, o que se pode concluir que as investigações estatísticas por meio de análise de regressão linear múltipla e análise de regressão de *Poisson*, entre outras, apresentaram linearidade e alta correlação para identificar as variáveis de significância para validar a eficácia da técnica *poka-yoke* implementada em uma indústria do setor metalúrgico do interior de São Paulo.

Palavras-chaves: *Poka-yoke*. Balança de precisão. Eficácia. Regressão linear múltipla. Regressão de *Poisson*.

ABSTRACT

The success of an industry is associated with effectiveness, product quality and minimizing costs relating to losses. Various techniques can be used to detect possible errors in the process which can lead to significant gains for the industry. A technique of great use by the leading industrialized countries is poka-yoke introduced by the system defined in the context of the Zero Quality Control (ZQC) philosophy. The objective of this study is to demonstrate the efficiency of electronic poka-yoke through statistical analyzes of the data collected before and after the precision scale use in kit packaging process, which includes the counting and verification of the pieces that have varying amounts and sizes and still the request guaranteed traceability. To check the gains achieved by the use of poka-yoke technique various statistical procedures were used such as multiple linear regression analysis and Poisson regression analysis, among others. The results showed a large reduction of missing pieces over the three years of observation of this case study, especially with the elimination of errors verified after-implementation of poka-yoke in the last year of analysis, it's possible to conclude that the statistical investigations through multiple linear regression analysis and Poisson regression analysis, among others, showed linearity and high correlation to identify the significance variables to validate the effectiveness of technical poka-yoke implemented in an industry in the metallurgical sector in the countryside of São Paulo.

Keywords: *Poka-yoke. Precision scale. Effectiveness. Multiple linear regression. Poisson regression.*

Lista de figuras

Figura 1 - Classificação dos sistemas <i>poka-yokes</i>	19
Figura 2 - Classificação de tipos de métodos <i>poka-yokes</i>	21
Figura 3 - Exemplos de utilização de métodos <i>poka-yokes</i>	22
Figura 4 - Três situações possíveis de erro com três funções do <i>poka-yoke</i>	23
Figura 5 - Resultados da avaliação de quatro <i>poka-yokes</i> em três empresas pesquisadas	31
Figura 6 - Processo de aferição de pastilhas de freios por meio de câmera de visão artificial	31
Figura 7 - Hardware de inspeção automática de defeitos de superfície em processo de revestimento de painéis de cristal líquido.....	34
Figura 8 - Visão microscópica do defeito.....	35
Figura 9 - Antes e depois da melhoria da legibilidade em inspeção automática.....	36
Figura 10 - Processo de monitoramento eletrônico do equipamento de corte por jato de água.	37
Figura 11 - Esquema do fluxo de fabricação com o <i>poka-yoke</i> implementado.....	37
Figura 12 - Peças produzidas com a implementação do dispositivo <i>poka-yoke</i>	38
Figura 13 – Resultados da análise de ações testadas para a eliminação de erros cometidos por pessoas.....	39
Figura 14 - <i>Poka-yoke</i> de gabarito da estrutura de máquina.	43
Figura 15 - Arquitetura cliente/servidor para a implementação do <i>poka-yoke</i> digital	45
Figura 16 - Obtenção de peso médio para peças múltiplas.	46
Figura 17 - Cadastramento das tolerâncias para peças unitárias.	47
Figura 18 - Romaneio de embarque para coleta de peças nos depósitos.....	48
Figura 19 - Carrinhos transportadores das peças que serão aferidas na balança digital.....	48
Figura 20 - Pontos de uso de aferição das embalagens (plástica e madeira).....	49
Figura 21 - Leitor óptico para aferir a ordem de carregamento na balança.....	49
Figura 22 - Funil de escoamento de peças miúdas na embalagem plástica.....	50
Figura 23 - <i>Poka-yoke</i> digital comparando as quantias esperadas com as pesagens reais.	50
Figura 24 - <i>Poka-yoke</i> digital liberando a quantia de peças esperadas na balança.	51
Figura 25 - Impressor da etiqueta de identificação da pesagem.....	51
Figura 26 - Etiquetas coladas no saco plástico dentro da caixa de madeira.	52
Figura 27 - Vista de uma caixa de madeira completa.....	52
Figura 28 - Rastreabilidade do pedido conferido por balança de precisão.....	53
Figura 29 - Diagrama de pizza para os números de peças faltantes em cada ano.	56
Figura 30- Diagrama de pizza para os números de peças faltantes em cada família de produtos	56
Figura 31 - Histogramas para os números de peças faltantes em cada ano.....	56

Figura 32 - Histogramas para os números de peças faltantes em cada família de produtos em cada ano.	57
Figura 33 - Histogramas para os números de peças faltantes em cada ano (observado e esperado sob a hipótese de nulidade).	58
Figura 34 - Histogramas para os números de peças faltantes em cada família (observado e esperado sob a hipótese de nulidade).	59
Figura 35 - Gráficos de resíduos (máquinas).....	61
Figura 36 - Gráficos de resíduos (famílias de máquinas).....	62
Figura 37 - Gráficos da resposta de quantidade de peças faltantes versus algumas covariáveis	65
Figura 38 - Gráficos de resíduos (regressão com resposta log(quantidade))	67
Figura 39 - Gráficos de quantidades de peças faltantes e médias estimadas vs amostras.....	70

Lista de Quadros

Quadro 1 - A classificação de erros humanos.	15
Quadro 2 - Os métodos de classificação de erros.	16
Quadro 3 - Número de checagens e erros detectados pelo Palmtop.	33
Quadro 4 - Quantidade de peças faltantes nas embalagens enviadas aos clientes	55
Quadro 5 - Frequências observadas de peças faltantes nos anos de 2011,2012 2013.	57
Quadro 6 - Teste qui-quadrado de ajuste para as contagens observadas por ano de embalagem	58
Quadro 7 - Teste qui-quadrado de ajuste para as contagens observadas para as famílias de máquinas	59
Quadro 8 - Médias de peças faltantes para cada tipo de máquina e família de máquinas.	60
Quadro 9 - ANOVA log(contagem peças faltantes) - fator máquinas.	60
Quadro 10 - ANOVA log (contagem peças faltantes) - fator famílias de máquinas.	62
Quadro 11 - Estimadores de mínimos quadrados, estatística T de Student e valor-p.	66
Quadro 12 - Sumários a posteriori e intervalos de credibilidade 95%.	69

Sumário

1	Introdução	10
1.1	Contextualização e problemática	10
1.2	Questão de pesquisa	11
1.3	Justificativa e relevância do tema.....	11
1.4	Objetivos	11
1.5	Objetivos específicos.....	11
1.6	Delimitação da pesquisa.....	11
1.7	Estrutura do trabalho	11
2	Revisão bibliográfica.....	13
2.1	A filosofia <i>Zero Quality Control</i> (<i>ZQC</i>) e o conceito <i>poka-yoke</i>	13
2.2	Classificação de <i>poka-yoke</i>	19
2.3	Exemplos práticos de <i>poka-yokes</i>	23
2.4	Técnicas estatísticas utilizadas no estudo.....	27
2.4.1	Análise descritiva dos dados	27
2.4.2	Análise de variância (ANOVA)	27
2.4.3	Análise de regressão linear múltipla	27
2.4.4	Análise de regressão de <i>Poisson</i>	28
2.5	Aplicações de eficiência de <i>poka-yokes</i>	29
2.5.1	Teste aleatório de 100 peças para aceitação e validação de <i>poka-yoke</i>	29
2.5.2	Validação de <i>poka-yoke</i> por análises estatísticas de coeficiente de Pearson, regressão linear e ANOVA.....	29
2.5.3	Proposta de uma metodologia para avaliar dispositivos <i>poka-yokes</i>	30
2.5.4	Palmtop é avaliado para evitar erros médicos.....	32
2.5.5	Acuracidade na medição de defeitos de exibição da superfície de transistor de película fina de cristal líquido (TFT-LCD).....	34
2.5.6	Monitoramento da eficiência das peças produzidas com a implantação do <i>poka-yoke</i>	36
2.5.7	Rede bayesiana estimando confiabilidade em fabricação para dispositivos <i>poka-yokes</i> ...	38
3	Metodologia de pesquisa e coleta dos dados.....	40
3.1	Classificação	40
3.2	Amostra	40
3.3	Procedimentos operacionais para a coleta de dados.....	41
4	Implementação e aplicação do dispositivo <i>poka-yoke</i>	42
4.1	Descrição da empresa.....	42
4.2	A primeira proposta de <i>poka-yoke</i> por gabarito em EVA	42

4.3 A segunda proposta de <i>poka-yoke</i> digital.....	44
5 Modelagem e resultados.....	53
5.1 Análise descritiva dos dados	55
5.2 Análise de variância (ANOVA)	60
5.3 Análise de regressão dos dados	63
5.4 Análise de regressão de <i>Poisson</i>	67
5.5 Discussão dos resultados.....	70
6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	71
6.1 Conclusões	71
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	72
Referências.....	74
Apêndice A: Algumas considerações sobre a análise bayesiana	77

1 Introdução

1.1 Contextualização e problemática

A produção de produtos e serviços de alta qualidade para satisfazer as exigências dos clientes é a meta a ser perseguida por todas as sociedades do mundo. No entanto, não existe empresa ou sistema sem nenhum erro cometido ou nenhum produto defeituoso na entrega ao cliente, sendo esse o grande problema que as empresas têm de enfrentar todos os dias na busca permanente de melhorias que visam certificar de que os clientes estão recebendo produtos e serviços exatamente como foram especificados e, de outro modo, como detectar possíveis não conformidades de qualidade, tanto na fase inicial quanto durante todo o processo de manufatura (SISSONEN, 2008).

Nesse contexto uma abordagem concreta para lidar com os erros é a aplicação de dispositivos *poka-yokes*. Esses dispositivos impedem que um erro se torne um defeito de serviço operacional e seja, em seguida, percebido pelo cliente. Os *poka-yokes* partem do conceito de que as pessoas não cometem erros por vontade própria, mas por inúmeras razões, os erros podem ocorrer e de fato ocorrem de maneira involuntária (LIKER e MÉIER, 2007).

Para esse trabalho, a indústria considerada como objeto de estudo vinha contabilizando alto índice de peças faltantes nas embalagens de *kits* provocadas por erros de contagem e causando descontentamentos para os clientes, o que potencializou a implantação de um dispositivo *poka-yoke* eletrônico utilizando balança de precisão, apoiada por tecnologia de informação, para aferição de peças de tamanhos e quantidades variadas dentro das respectivas embalagens, além de garantir a rastreabilidade do pedido. No entanto, para validar essa nova sistemática de inspeção eletrônica foi feita uma análise dos dados de contagem de peças faltantes de forma descritiva e também usando algumas técnicas estatísticas existentes como forma de avaliar a eficácia do novo processo de embalagem de *kits*.

Com respeito à abordagem sobre a eficácia de *poka-yokes* na prática, foi realizada uma revisão da literatura sobre diferentes avaliações de *poka-yokes* implantados por empresas e organizações que avaliaram esses dispositivos por diversos meios, entre os quais, o uso da análise estatística, o que motivou o presente estudo. Além da avaliação estatística que detecta os ganhos significativos usando um novo dispositivo *poka-yoke* projetado para a indústria, este trabalho descreve a construção e o desempenho desse mecanismo eletrônico com sua validação por meio de um estudo de caso implantado em um sistema de manufatura.

1.2 Questão de pesquisa

Como é possível avaliar a eficácia de um dispositivo *poka-yoke* aplicado para evitar peças faltantes no processo de embalagem do *kit*?

1.3 Justificativa e relevância do tema

Por intermédio de um receituário de análises estatísticas contribuir com empresas e organizações a avaliação da eficácia de uma implementação de *poka-yoke* com sucesso.

1.4 Objetivos

Demonstrar a eficácia do *poka-yoke* na prática por meio de análises estatísticas dos dados coletados antes e depois da implantação do novo processo de embalagem utilizando balança de precisão.

1.5 Objetivos específicos

Avaliar os produtos ou máquinas produzidos, a relação entre as famílias desses produtos e os anos pesquisados com maior significância entre as variáveis de interesse.

1.6 Delimitação da pesquisa

Com relação às limitações deste estudo, pode-se considerar que esta pesquisa restringiu-se a um determinado segmento de indústria metalúrgica. No entanto, sugere-se que pesquisas desta mesma natureza sejam realizadas em outros ramos de indústria, instituições e serviços. Desta forma, as características modeladas por meio de análises estatísticas para avaliar o dispositivo *poka-yoke* não possui, em princípio, nenhuma limitação para a sua aplicabilidade em ambientes distintos.

1.7 Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido em 6 seções. Inicialmente, a seção 1, denominada *Introdução*, compõe-se pela contextualização, questão da pesquisa, justificativa, objetivos, objetivos específicos, delimitação e estrutura do trabalho.

Na sequência, a seção 2 trata de toda a revisão bibliográfica, compreendendo: a filosofia *Zero Quality Control* (*ZQC*) e o conceito *poka-yoke*, classificação de *poka-yokes*,

técnicas estatísticas utilizadas no estudo, aplicações de eficiência de *poka-yokes* e exemplos práticos de *poka-yokes*.

Na seção 3 é apresentada a metodologia da pesquisa compreendendo a sua classificação, a amostra e os procedimentos operacionais.

Na seção 4 introduz-se a apresentação da empresa e a abordagem de toda a trajetória de implementação do *poka-yoke*, objeto do estudo proposto de aplicação prática na indústria.

Na seção 5 são mostrados a modelagem e os resultados obtidos.

Na seção 6 apresenta-se algumas conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, no apêndice A, são relatadas algumas considerações sobre a análise bayesiana.

Todas as análises demonstradas nesse estudo foram realizadas com o uso do *software* MINITAB[®] versão 16.

2 Revisão bibliográfica

2.1 A filosofia *Zero Quality Control* (*ZQC*) e o conceito *poka-yoke*

Segundo Wood Junior e Urdan (1994), foi Philip Crosby quem criou a concepção *zero defeitos* e popularizou o conceito de fazer certo da primeira vez. Em sua carreira profissional, Crosby (1994) relata a sua experiência como gerente de qualidade na empresa Martin-Marietta (EUA) entre os anos de 1957 e 1965, período em que desenvolveu o conceito *zero defeitos* que seria depois conhecido mundialmente e que o faria entrar para a história da qualidade.

Para Crosby (1994), a qualidade é vista como conformidade com os requisitos, e acrescenta que se existe empenho em fazer bem feito na primeira vez, então os desperdícios seriam eliminados e a qualidade não seria dispendiosa.

Seguindo o mesmo pensamento, Shiguo Shingo, em 1961, como engenheiro da empresa automobilística Toyota, deu os primeiros passos na propagação da concepção de *zero defeitos* e da criação do conceito *poka-yoke*. O termo inicial era *baka yoke* que significava erro **idiota**, mas o termo tinha uma conotação **pejorativa, desonrosa, muito ofensiva** e foi mudado para *poka-yoke*. Esse termo é uma sistemática japonesa, ou seja, um dispositivo à prova de erro ou à prova de engano. A sua abordagem é por meio da eliminação e remoção das causas dos defeitos. Trata-se de um processo de melhoria projetado para prevenir a ocorrência de um defeito específico. Os *poka-yokes* procuram prevenir erros humanos, aumentam a segurança, eliminam produtos defeituosos e previnem danos à máquina. É considerado um erro qualquer desvio de fabricação em relação ao processo especificado, neste caso, o autor concebe que pode haver um erro sem defeito, mas não pode haver um defeito sem um erro (MANIVANNAN, 2006).

De acordo com Shingo (1986), em termos conceituais, um *poka-yoke* é um mecanismo para a detecção de erros e falhas, que inspeciona 100% das peças, trabalhando de forma independente no período de atenção do operador. Outros autores como Plonka (1997) consideram que um *poka-yoke* é um mecanismo para detectar, eliminar e corrigir os erros na sua fonte, antes de chegar ao cliente. Middleton (2001) define *poka-yoke* como a prática sistemática de erradicar os erros localizando a sua causa raiz. Grout (2007) conceitua *poka-yoke* como o uso de processos ou características de *design* para evitar erros ou o impacto negativo dos erros. Para Burlikowska e Szewieczek (2009) *poka-yoke* é uma técnica que pode ser aplicada tanto para prevenir as causas, o que resultará em ocorrências subsequentes de erros, quanto para a realização de controle barato para determinar se o produto será aprovado

ou rejeitado. Os mesmos autores avaliam que não é sempre 100% a probabilidade de eliminação de todos erros, em tais casos, o *poka-yoke* é detecção do erro o mais cedo possível. Ghadge e Mone (2012) mencionam que o *poka-yoke* tem como objetivo evitar defeitos de um produto, prevenindo ou corrigindo os erros o mais cedo possível, detectando erros localizados antes de a aplicação atingir a fase formal de testes. Apesar de não ser possível eliminar todos os erros que as pessoas cometem, o *poka-yoke* pode evitar que esses erros cheguem ao cliente.

Shingo (1996) faz uma distinção clara entre erros e defeitos. Para este autor, eles são inevitáveis porque dependem do ser humano. É impossível manter a concentração do homem, em tempo integral, apesar de receber instruções, normas e procedimentos. Já os defeitos são resultantes de uma sequência de erros e aqueles ocasionados geralmente por falha humana podem ser evitados se o processo produtivo for submetido ao dispositivo *poka-yoke*. Com reforço, os defeitos resultam em permitir que um erro chegue ao cliente, sendo o defeito inteiramente evitável, tendo em vista que o objetivo do *poka-yoke* é o de engenheiro do processo, de modo que os erros podem ser evitados ou imediatamente detectados e corrigidos. Conclui-se que os erros não se tornarão defeitos se os erros dos trabalhadores são descobertos e eliminados de antemão. Defeitos surgem porque os erros são feitos; os dois têm uma relação de causa e efeito. Diante disso, o *poka-yoke* utiliza-se de recursos de engenharia e criatividade para encontrar uma forma de prevenção aos erros e então descobrir a causa raiz para atacá-los e corrigi-los. Esse dispositivo de caráter preventivo não repudia os erros, mas a ideia de que os erros inevitavelmente se tornarão defeitos.

Desse modo, Manivannan (2007) define que um defeito é qualquer desvio de especificações de produtos que podem levar à insatisfação do cliente. Para ser considerado um defeito, o produto deve desviar-se das características de fabricação ou de projeto, e não deve satisfazer as expectativas dos clientes internos ou externos.

Sendo que a origem dos erros está relacionada com problemas técnicos, de gestão ou humanos, Shingo (1996) classifica aqueles cometidos pelos operadores em três tipos:

- Erros inadvertidos – são não intencionais resultantes da falta de atenção que acontece de forma aleatória; são intrínsecos à limitação humana, logo, não são afetados pelo nível de motivação, podem ser minimizados por meio da redução da necessidade de atenção do operador, de melhorias nas condições de trabalho, eliminação das fontes de distração, rotatividade de tarefas diversas, períodos de descanso e por fim, pelo uso de dispositivos *poka-yokes*;

- Erros de natureza técnica - estão intimamente relacionados com a falta de conhecimento, formação ou capacidade técnica para executar a operação adequadamente; as soluções para estes erros envolvem qualificação profissional, mudanças tecnológicas e melhorias eventuais do processo;
- Erros intencionais - os operadores cometem de forma premeditada; normalmente resultam de péssimo relacionamento do operador com as lideranças, com a empresa ou até mesmo com a sociedade; a solução para este tipo de erro é muito mais de natureza psicológica do que técnica.

Shimbun (1988) classifica dez tipos diferentes de erros humanos que são apresentados no quadro 1 a seguir.

Quadro 1- A classificação de erros humanos.

Tipo de erro humano	Exemplo
<i>Esquecimento</i>	Esquecer de coisas quando não há concentração de atenção.
<i>Os erros devido a mal-entendido</i>	Cometer erros ao saltar para conclusões erradas antes de estar familiarizado com a situação.
<i>Erros na identificação</i>	Julgar erroneamente uma situação por visualizar rapidamente, estar longe ou não ver claramente.
<i>Os erros cometidos por amadores</i>	Cometer erros por não possuir experiência.
<i>Erros involuntários</i>	Ocorre devido à distração, resultando em erros de origem desconhecida.
<i>Erros devido à lentidão</i>	Pode ocorrer quando ações são retardadas por atrasos no julgamento.
<i>Erros devido à falta de normas</i>	Falta de adequado procedimento de instruções ou normas de trabalho. Por exemplo, uma máquina poderia não funcionar sem aviso.
<i>Erros Surpresa</i>	Executar o equipamento de forma diferente do que é esperado.
<i>Erros intencionais</i>	Algumas pessoas cometem erros deliberadamente

Fonte: Shimbun (1988).

Como esta classificação aponta, a possibilidade de ocorrer um erro humano é muito notável especialmente em tarefas de manufatura. A fim de obter um nível satisfatório de qualidade quanto às falhas por erros humanos, eles devem ser eliminados ou, pelo menos, a sua frequência deve ser drasticamente diminuída.

Os erros podem também ser classificados de várias formas. Hinckley (2001) coletou ampla gama de métodos de classificação utilizados na literatura sobre dispositivos *poka-yokes* (ver quadro 2). Embora os princípios subjacentes aos dispositivos *poka-yokes* sejam extremamente simples, uma grande fração de soluções de detecção de erros requer adaptações únicas para problemas específicos. Assim, o ponto positivo ao *poka-yoke* não é apenas classificar erros e defeitos de forma inequívoca, mas encontrar a melhor solução disponível para o problema. Hinckley (2001) menciona que os esquemas de classificação levaram à melhor compreensão dos erros e limitações humanas.

Quadro 2 - Os métodos de classificação de erros.

Categoria de erros	Exemplos de causa
<i>Os fatores causais</i>	Fadiga, urgência, interrupção;
<i>Projeto fase</i>	Projeto, fabricação, montagem;
<i>Fatores ergonômicos</i>	Percepção, decisão, ação, habilidade, treinamento;
<i>Probabilidade de erro humano</i>	Frequência de erro, o desempenho humano;
<i>Fator de estresse</i>	Carga de trabalho, mudança de trabalho ou frustração;
<i>Erros de consequência</i>	Lesão, perda, avaria;
<i>Função ou tarefa</i>	Soldagem, usinagem, detalhando, inspecionando;
<i>Fatores comportamentais</i>	Comunicação, processos motores, percepção;
<i>A ação corretiva</i>	Retrabalho, reparo, sucata

Fonte: Hinckley (2001).

Na avaliação de Manivannan (2006), o *poka-yoke* recai em determinadas categorias específicas:

- **Física:** O *poka-yoke* envolve a instalação de componentes como dispositivos elétricos ou sensores para eliminar as condições que podem levar a um erro;
- **Operacional:** O *poka-yoke* envolve a realização de modificações ou a instalação de dispositivos que reforçam a sequência de procedimento operacional correto;
- **Filosófica:** O *poka-yoke* envolve a identificação de situações que causam defeitos como a capacitação da força de trabalho, por exemplo. Algumas abordagens para os *poka-yokes* incluem prevenção que visa a prevenir os erros de criação de defeitos e, imediatamente, inicia ações corretivas para evitar que múltiplos defeitos ocorram.

Shingo (1996) categorizou três diferentes tipos de inspeção de erros:

1. Inspeção de Julgamento é o tradicional processo de identificar os produtos que estão com defeito antes de serem liberados para distribuição, conhecido como *inspeção de qualidade*. O pensamento moderno de qualidade, com razão, sugere que esta é uma forma inadequada e cara de manter a qualidade aceitável do produto;

2. Inspeção Informativa: utiliza dados obtidos por meio de inspeção para modificar o processo e prevenir defeitos. O Controle estatístico de processo tradicional (CEP) é uma forma de inspeção.

3. A inspeção na fonte: se baseia em auto verificações e o verdadeiro objetivo é modificar o processo para que os defeitos futuros sejam evitados. Também permite que o operador, que deve estar ciente do ambiente de processo, identifique e isole possíveis causas.

Shingo percebeu que o controle de qualidade estatística tem uma proposta diferente em relação ao conceito de *zero defeitos*, principalmente pela instalação de dispositivos *poka-yokes* para evitar defeitos no processo de controle da produção, argumentando que alcançar as metas desejadas pode ser impossível usando apenas métodos de controle de qualidade estatística.

Segundo Shingo (1996, p.23-24), os princípios dos mecanismos anti-erros tornando desnecessárias funções como uso da memória, percepção, julgamento e movimento são:

- **Eliminação** das atividades necessárias de um trabalho que o tornam propenso a erros, tornando desnecessárias as funções citadas. Exemplo: equipamentos quentes que provocam queimaduras, de forma a isolar partes desses equipamentos para evitar queimaduras nas peças produzidas, tornando-as defeituosas.

- **Substituição** de métodos de utilização por outros confiáveis. No caso de montar partes erradas, a solução é a verificação de peças por sensores, simples e baratos como os gabaritos substituindo as funções.

- **Simplificação** para reduzir os erros humanos no uso das funções que o trabalho requer, elaborando símbolos grandes e de fácil visualização, dividindo peças grandes e pesadas para facilitar o transporte e armazenagem das peças com a mesma especificação no mesmo lugar.

- **Deteção** dos erros por meio de monitoramento de inspeção nos processos seguintes, para verificação dos possíveis desvios em relação aos padrões estabelecidos, como por exemplo dar forma às peças para que seja impossível montar errado e ainda utilizar sensores para detectar a presença (ou ausência) de peças e a normalidade (ou anormalidade) de movimentos.

- **Atenuação e organização** das tarefas em paralelo, ou introduzir dispositivos, protetores ou observadores de colisão, para reduzir ou absorver os defeitos e erros. Além disso, delegar aos operadores o manuseio de suas próprias chaves elétricas e manter a chave central somente com o supervisor. Envolver materiais que absorvam colisões para não ocorrer danos.

É fundamental perceber que as técnicas *poka-yokes* objetivam descobrir e eliminar 100% dos erros na fonte, criando dispositivos simples e baratos. Neste caso, este conceito também deve envolver os funcionários a participar da substituição das funções, em vez de limitar o funcionário a somente utilizar a habilidade do serviço. O funcionário é liberado para raciocinar e participar de melhoria dos processos, do produto e da empresa em si. Neste sentido, os engenheiros têm um papel relevante para ajudar os trabalhadores a desenvolver dispositivos *poka-yokes* na condição de facilitador deste processo (SHINGO,1996).

Por outro lado, Shahin e Ghasemaghaei (2010) relatam que embora os esforços de Shingo estivessem focados na indústria de transformação, o conceito *poka-yoke* pode ter ainda mais mérito no setor de serviços. Em ambas as áreas o cliente é o foco de atenção. O *poka-yoke*, como uma das técnicas eficazes para projetos de qualidade com experiência em fabricação, tem sido sugerido e desenvolvido para o serviço livre de falha com objetivo de zero defeitos. Nesta linha de raciocínio, Manivannan (2006) afirma que muitas pessoas pensam a respeito de técnicas *poka-yokes* como a aplicação de interruptores de limites, sistemas de inspeção óptica, pinos guia, ou desligamentos automáticos que devem ser implementados pelo departamento de engenharia. Esta é uma visão muito estreita e equivocada de *poka-yoke*. Tais mecanismos podem ser elétricos, mecânicos, processuais, visuais, humanos ou qualquer outra forma que impeça a execução incorreta de uma atividade do processo. Um dispositivo *poka-yoke* também pode ser implementado em outras áreas de produção, tais como vendas, entrada de pedidos, compras, ou desenvolvimento de produtos, em que o custo de erros é realmente muito maior do que aqueles custos de erros que ocorrem no chão de fábrica. A realidade é que a prevenção, detecção ou remoção de defeitos têm ampla aplicação na maioria das organizações.

Segundo a ótica de Manivannan (2006), há bons motivos para implementar dispositivos *poka-yokes*:

- **Vantagem competitiva:** No mercado global o custo da qualidade é parte da vantagem competitiva de uma empresa. Custa muito menos evitar a ocorrência de defeitos em

primeiro lugar do que detectá-los mais tarde por meio de inspeção, e depois descobrir que eles devem ser refeitos ou reparados.

- **Trabalhadores treinados:** Quando cada funcionário entende os princípios do *poka-yoke*, as equipes de trabalho podem ver mais facilmente como os defeitos são gerados, e então agir de forma eficaz para eliminá-los. Podem participar do projeto e da melhoria das operações de processamento de peças e montagem para evitar a ocorrência de defeitos

- **Previsibilidade:** Se as nossas máquinas (manuais ou robóticas) incluem dispositivos à prova de erro, em seguida, temos a certeza de que o produto final será livre de defeitos. Este resultado elimina operações de inspeção e retrabalho, bem como sucata, os quais aumentam os custos de produção.

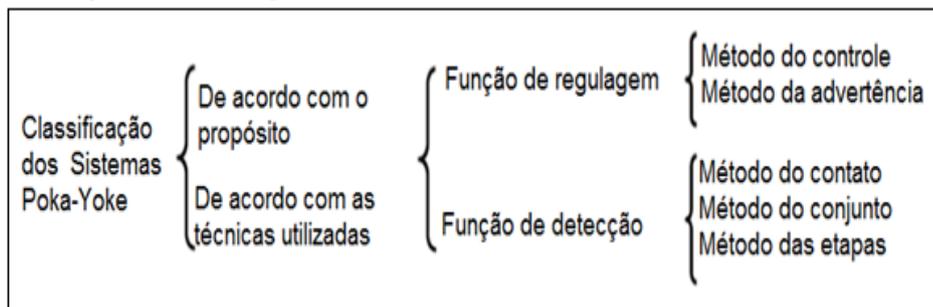
- **Varição reduzida:** Os dispositivos à prova de erro também garantem que todos os subconjuntos e conjuntos concluídos são exatamente os mesmos. Haverá pouca chance de variação das peças se as máquinas são projetadas ou modificadas para evitar erros e seus defeitos resultantes.

Segundo Fisher (1999), o grande milagre japonês em termos de qualidade surgiu a partir da aplicação de milhares de dispositivos *poka-yokes* simples. Cada um é relativamente simples, mas em conjunto o seu efeito é enorme.

2.2 Classificação de *poka-yoke*

Shingo (1996) classifica os dispositivos *poka-yoke* conforme a figura 1:

Figura 1 - Classificação dos sistemas *poka-yokes*



Fonte: Adaptado de Shingo (1996).

A seguir cada classe é explicada:

- **Método de Controle:** Quando o *poka-yoke* é ativado, a máquina ou linha de processamento é interrompida, de tal forma que o problema possa ser corrigido imediatamente; é o controle mais rigoroso porque paralisa o processo até que a causa do

defeito seja enfim corrigida. Um exemplo prático pode ser dado pela ferramenta de aperto que desarma quando atingir determinado torque;

- **Método de Advertência ou Alerta:** Detecta a anormalidade e sinaliza a ocorrência por meio de sinais sonoros ou luminosos visando a alertar o operador e demais responsáveis pelo processo sem, no entanto, interrompê-lo. O *poka-yoke* de advertência permite que o processo que está gerando o defeito continue operando, caso os trabalhadores não atendam ao aviso. Os defeitos mais frequentes ou impossíveis de serem corrigidos exigem um *poka-yoke* de controle, enquanto a frequência de defeitos é relativamente baixa e o defeito é possível de ser corrigido, é preferível um *poka-yoke* de advertência. Exemplo: a luz (vermelha) de atenção no *laptop* e som *beep* em celulares quando a bateria estiver baixa.

- **Método do Contato:** Detecta a anormalidade na forma ou dimensão por meio de dispositivos que se mantêm em contato com o produto. Identifica os defeitos em virtude da existência ou não de contato entre o dispositivo e alguma característica ligada à forma ou dimensão do produto. Exemplo: sensores que indicam condição adequada para operação.

- **Método do Conjunto:** Utilizado em operações executadas numa sequência de movimentos ou passos pré-estabelecidos, garantindo que nenhum dos passos sejam negligenciados; determina se um dado número de atividades previstas são executadas, como exemplo de uma operação que impede a passagem de peças posicionadas incorretamente.

- **Método das Etapas:** Evita que o operador realize, por engano, uma etapa que não faça parte da operação. Determina se são seguidos os estágios ou operações estabelecidas por um dado procedimento. Exemplo: chave de ignição do automóvel só sai do contato se o carro estiver desligado.

Shingo (1996) afirma que o dispositivo *poka-yoke* em si não é um sistema de inspeção, mas um método de detectar defeitos ou erros que pode ser usado para satisfazer uma determinada função de inspeção. Por exemplo, um gabarito que rejeita uma peça processada incorretamente é um *poka-yoke* que desempenha a função de inspeção sucessiva. Porém, se detectar defeitos depois que eles ocorrerem não for a maneira mais eficaz de eliminar os defeitos naquele processo específico, um outro sistema deve ser usado.

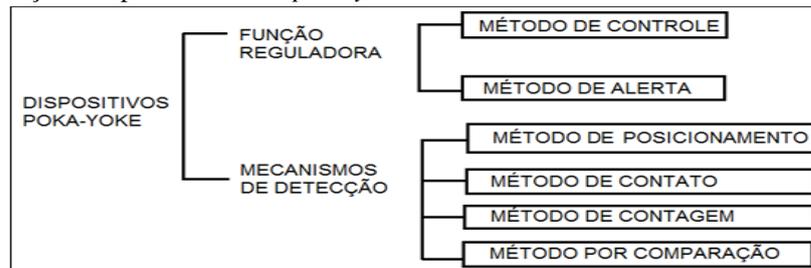
Nesse contexto, uma boa maneira para adoção de métodos de controle de qualidade efetivos é identificar o sistema de inspeção que melhor satisfaz as necessidades de um determinado processo. O passo seguinte é identificar um método de *poka-yoke* (controle ou advertência) que seja capaz de satisfazer a inspeção desejada. Somente depois de definido o

método apropriado, deve-se considerar qual o tipo do dispositivo *poka-yoke* (contato, conjunto ou etapas).

Autores como Moura e Banzato (1996) ainda complementam os mecanismos de detecção separando em métodos de posicionamento (uso, contato, contagem e comparação) a fim de melhor detalhar e classificar cada tipo de *poka-yoke*.

A figura 2 esquematiza a classificação dos tipos de métodos *poka-yokes*:

Figura 2 - Classificação de tipos de métodos *poka-yokes*



Fonte: Moura e Banzato(1996)

Assim, estes autores classificam os tipos de *poka-yokes* em:

a) **Método de controle:** são métodos que, na ocorrência de anormalidades, paralisam o equipamento ou interrompem a operação, evitando, assim, a ocorrência ou reincidência de defeitos;

b) **Método de alerta:** são métodos que, na ocorrência de anormalidades, ativam sinais luminosos ou sonoros de alerta, indicando a necessidade de providências sem, contudo, paralisar o equipamento ou interromper a operação;

c) **Métodos de posicionamento:** elaboração de dispositivos que permitem a condução da operação somente quando do posicionamento correto do conjunto de elementos nela envolvidos, impedindo fisicamente que o conjunto seja montado de forma inadequada;

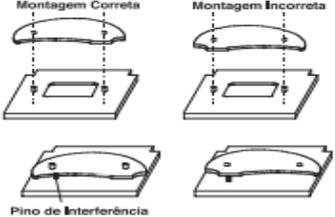
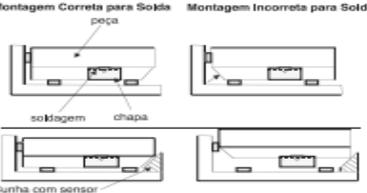
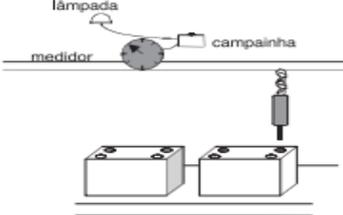
d) **Métodos de contato:** estão baseados na liberação da condução de uma operação a partir do contato de sistemas de sensores que indicam condição adequada para operação;

e) **Métodos de contagem:** por meio da contagem de elementos, verificam as características de conformidade do conjunto, alertando no caso de detecção de anormalidades e impedindo a continuidade da operação;

f) **Métodos de comparação:** utilizando dispositivos que possibilitem comparação de grandezas físicas (temperatura, pressão, torque etc.), impedem a continuidade da operação quando da detecção de anormalidades.

A figura 3 mostra alguns exemplos de aplicações práticas de métodos *poka-yokes* (IMAN, 1998).

Figura 3 - Exemplos de utilização de métodos *poka-yokes*

 <p>Montagem Correta</p> <p>Montagem Incorreta</p> <p>Pino de Interferência</p>	<p>MÉTODO DE POSICIONAMENTO Uma determinada peça pode ser montada em posições diferentes, mas apenas uma posição é correta. Assim foi instalado um pino de interferência para que não seja possível montar a peça em outras posições. O pino de interferência é um Poka Yoke de posicionamento evitando assim que por distração ou qualquer outro motivo o operador monte a peça invertida e esta chegue ao cliente.</p>
 <p>Montagem Correta para Solda</p> <p>Montagem Incorreta para Solda</p> <p>peça</p> <p>soldagem</p> <p>chapa</p> <p>Cunha com sensor</p>	<p>MÉTODO DE CONTATO Uma chapa pode ser soldada a uma peça em posições diferenciadas, mas apenas uma posição é a correta. Assim foi instalado uma cunha com sensor que identifica se a peça está na posição correta. A cunha com sensor é um Poka Yoke, pois se a peça a ser soldada não estiver devidamente posicionada fazendo o contato com o sensor, o mesmo não libera a máquina de solda.</p>
 <p>lâmpada</p> <p>medidor</p> <p>campainha</p>	<p>MÉTODO DE COMPARAÇÃO Parafusadeira não garante torque especificado devido à variação da pressão de ar na linha de montagem. Instalado um medidor de pressão, que mede a variação de pressão da linha e compara com a pressão especificada mínima e máxima. O medidor é um Poka Yoke, pois se a pressão de ar cai durante a aplicação do torque na linha ele faz soar uma campainha, acende a lâmpada e trava o carro transportador da linha, até que seja aplicado novamente o torque especificado na peça.</p>

Fonte: Iman (1998).

Por fim, Patil et al. (2013) mencionam três tipos de *poka-yokes*:

a) Desligamento (Prevenção)

Com a implementação da função de desligamento, o processo potencializa a não ocorrência de defeitos em 100%. O erro que causar um defeito, o *poka-yoke* interrompe o processo, impedindo o fluxo de produtos defeituosos. Por exemplo, uso de fusíveis no circuito elétrico. Quando há curto-circuito, em seguida, o fusível é acionado e corta o fornecimento de energia elétrica, resultando em evitar qualquer acidente.

b) Controle

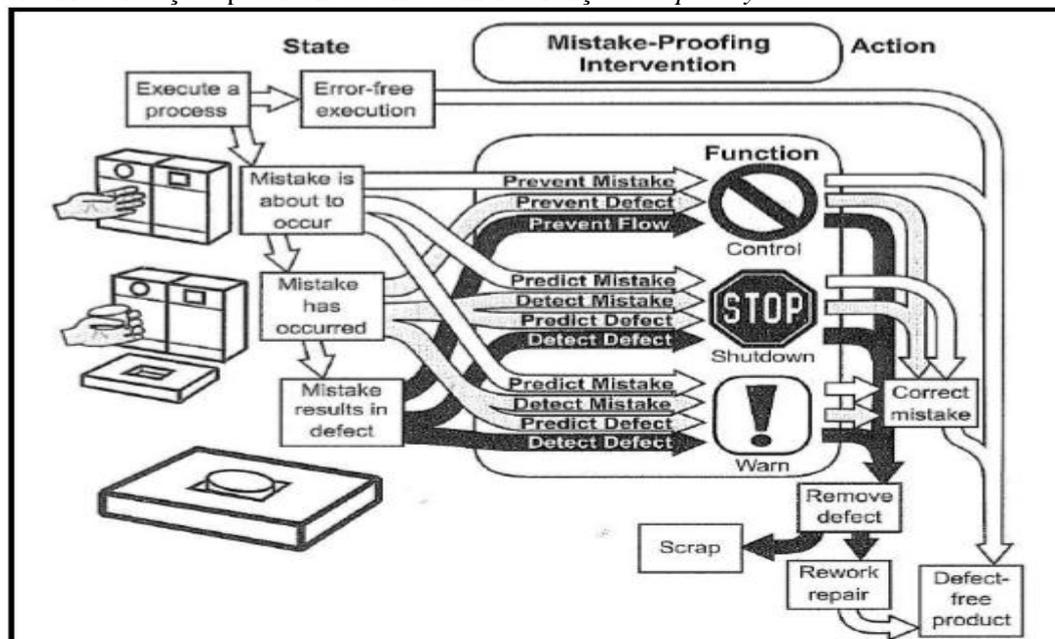
Os dispositivos *poka-yokes* estão instalados no processo que torna impossível produzir defeitos e/ou a fluir a não conformidade para o próximo processo. Quando o *poka-yoke* é ativado, a máquina ou linha de processamento é interrompido, de forma que o problema possa ser corrigido. Neste caso, o erro já ocorreu, mas não resultou em defeito – o *poka-yoke* controla. Este método atinge 100% de produtos livres de defeitos. Vale destacar que este tipo de *poka-yoke* de controle foi utilizado para o presente estudo.

c) Alerta ou advertência

Os dispositivos *poka-yokes* mostram a um trabalhador que um defeito foi produzido. Quando o operador recebe o aviso de defeito, ele deve interferir imediatamente para corrigir o processo responsável por causar o defeito. Esta função depende da natureza e do comportamento humano. Conclui-se que a função de alerta dá 30% da garantia de bons produtos. Na verdade, nesta situação informa a existência de defeito, mas não garante e não produz 100% de qualidade. Quando o *poka-yoke* é ativado, um alarme soa ou uma luz sinaliza, visando a alertar o trabalhador. Em suma, quando o erro está para ocorrer – o *poka-yoke* avisa a ocorrência de uma anomalia. Este método é utilizado em situações onde o erro não é crítico para o processo e indica a ocorrência de problema sem interromper a operação.

A figura 4 resume estas situações, segundo Sissonen (2008).

Figura 4 - Três situações possíveis de erro com três funções do *poka-yoke*.



Fonte: Sissonen (2008) apud Hinckley (2001).

2.3 Exemplos práticos de *poka-yokes*

Bayers (1994) destaca que outra consideração na concepção de *poka-yoke* é encontrar diferenças de valor da seguinte forma:

- Um bom exemplo é o *kit* de acondicionamento de peças para cada unidade montada. Em fontes de alimentação complexas, componentes podem ser omitidos em operações de montagem manual. O resultado de partes de *kits* é que, se alguns componentes sobram após a montagem estar completa, isto é uma indicação de que foram omitidos.
- Os padrões de peso também podem ser utilizados em fabricação eletrônica. Por exemplo, se o embalador esquecer constantemente de colocar um manual do proprietário na

caixa com conjuntos eletrônicos, o peso do manual pode ser determinado e detectado antes da caixa embalada deixar a área de transporte. Antes que eles sejam enviados, esses pacotes geralmente são pesados para determinar o custo de transporte. É evidente que o manual deve ter peso suficiente para ser detectado desta forma.

- Os cirurgiões têm empregado o uso de *poka-yoke* efetivamente, usando-o para indicar se todos os instrumentos (tesouras, braçadeiras etc.) foram removidos a partir dos pacientes doentes antes de fechar uma incisão.

Em casos extremos, na Toyota chegaram a implementar o denominado *círculo L*, que são estações com dupla ou tripla checagem em alguns itens que são motivos de reclamações de clientes (BUSINESS WEEK, 2003).

A seguir, serão exemplificados quarenta e cinco tipos diferentes de *poka-yokes* comumente utilizados em nosso cotidiano:

- 1 - A tomada de três pinos, em que não existe a possibilidade de inversão para utilizá-la;

2. A tomada USB do computador permite que os dispositivos USB (*pen-drives* por exemplo) sejam inseridos apenas em uma única direção. Eles não podem ser inseridos de cabeça para baixo;

3. O fecho de portas para evitar que elas batam ao abri-las repentinamente;

4. A verificação ortográfica em computadores;

5. Armários de arquivo podem cair se muitas gavetas são puxadas para fora. Para alguns, abrindo uma gaveta, o sistema bloqueia todo o resto, reduzindo a chance de tombamento do armário de arquivo;

6. *Antilock Braking Systems* (ABS) - evita-se o descontrole do veículo (permitindo que obstáculos sejam desviados enquanto se freia) e aproveita-se mais o atrito estático, que é maior que o atrito cinético (de deslizamento). O que costumava ser um erro de condução é agora o procedimento de frenagem adequada;

7. Disjuntores evitam sobrecargas elétricas que resultam em fogos. Quando a carga se torna grande demais, o circuito é interrompido;

8. As pias de banheiro têm um dispositivo para evitar que haja transbordamento de água. É o pequeno buraco perto do topo da pia que ajuda a evitar excessos;

9. Interruptor automático de luz no banheiro infantil liga a luz automaticamente. Após o banheiro ter sido desocupado por alguns minutos, a luz se apaga automaticamente. O erro de esquecer de desligar a luz é eliminado;

10. Tanto a pia quanto o mictório são equipados com sensores que captam a aproximação de pessoas. Estes sensores asseguram que a água seja desligada na pia e que o mictório libere a água após o uso;

11. O sistema operacional do computador solicita aos usuários se eles querem salvar primeiro o trabalho ao fechar um arquivo ou quando as alterações são feitas para um arquivo específico, de modo a evitar a perda de trabalho inadvertidamente;

12. Celulares têm opção de bloqueio de teclado para que as chaves desnecessárias não sejam pressionadas enquanto são transportados em bolsos ou bolsas;

13. Em alguns veículos há um sistema de travamento central. Isto assegura que todas as portas do automóvel sejam bloqueadas;

14. Em máquina de lavar roupa a operação paralisa com a abertura da tampa e isso ajuda a evitar quaisquer perigos e riscos;

15. Os cartões magnéticos em hotéis são usados para controlar o interruptor principal do sistema elétrico. Ele é ligado somente quando o cartão é inserido na tomada. Assim, economiza eletricidade;

16. O código de cores nos fios elétricos auxilia um eletricitista, fornecendo conexão correta em edifícios;

17. Os elevadores são equipados com um sensor para evitar que as portas fechem nas pessoas;

18. O bico de gás do fogão desliga automaticamente quando a panela ou frigideira é removida;

19. O forno de micro-ondas deixa de funcionar quando a porta é aberta;

20. Sensores e alarmes para elevadores são acionados quando a carga máxima é atingida.

21. As lojas de varejo e bibliotecas usam sistemas *Electronic Article Surveillance* para impedir a remoção da mercadoria e livros que não tenham sido pagos ou feito o *check-out*.

22. O sensor do radiador de carros indica a temperatura da água contida nesse reservatório;

23. Detector de metal usado para funções de segurança em instituições bancárias;

24. O leitor de código de barras ajuda um trabalhador na entrada de dados para digitalizar as informações e impedir que o erro ocorra por entrada de dados errados, além de aumentar a velocidade da operação;

25. A luz (vermelha) de atenção no *laptop* e som *Beep* em celulares quando a bateria estiver baixa;
26. Orientação de bateria em telefones celulares para a colocação correta;
27. O indicador de cinto de segurança em um carro;
28. Programação feita em máquinas ATM fornece um sistema de resposta interativa que orienta o cliente no processo de retirar o dinheiro; impede a ocorrência de erros das pessoas/clientes que divulgam um número PIN errado;
29. No supermercado a gaveta do dinheiro abre apenas quando uma transação é concluída;
30. As portas do ônibus desligam automaticamente após cada parada para evitar acidentes;
31. Um carro que só anda quando os cintos de segurança são utilizados tanto para condutor quanto para o passageiro;
32. Na máquina fotocopadora existe um sinal sonoro para indicar que o papel precisa ser carregado;
33. O uso de microfones para que o cliente possa ouvir melhor as promoções em supermercados evita interpretações errôneas;
34. Bandejas de instrumentos cirúrgicos com marcações para os instrumentos certos para cada cirurgia;
35. Sinos à porta de lojas para indicar entrada ou saída de clientes;
36. Instruções claras de quando as aeromoças devem sorrir em voos;
37. Dupla checagem de cálculos em relatórios ao cliente;
38. Ligações para lembrar reservas de horários em consultórios;
39. Ligações para lembrar paciente de condições especiais necessárias para exames de laboratório;
40. Fitas e correntes demarcando fluxo de filas em bancos;
41. Caixas automáticos que entregam cartão antes de entregar o dinheiro sacado;
42. Ligações de médicos para checar se paciente está tomando a medicação;
43. Em elevadores, sensores não permitem a abertura de portas quando ele está em movimento.
44. Os sensores acoplados em prensas industriais impedem a descida do equipamento para o processo de prensagem sempre que estiver presente a mão de um operador de forma indevida na área de risco da máquina, evitando acidentes.

45. Em processos industriais de engarrafadoras, os sensores verificam o nível de líquido dentro das garrafas, evitando não conformidades.

2.4 Técnicas estatísticas utilizadas no estudo

As subseções subsequentes abordarão a definição de cada uma das análises estatísticas que serão tratadas neste trabalho como análise estatística descritiva, de variância (ANOVA), de regressão linear múltipla e de regressão de *Poisson*.

2.4.1 Análise descritiva dos dados

Uma análise preliminar para qualquer conjunto de dados em áreas distintas como engenharia, medicina, economia, entre várias outras deve ser feita usando técnicas de estatística descritiva (por exemplo, gráficos, medidas de centralidade e variabilidade, histogramas, tabelas etc.) para a obtenção de informações preliminares sobre os dados antes de assumir qualquer modelo estatístico (ver por exemplo, BHATTACHARYYA e JOHNSON, 1978; BOX et al., 1978; CHATFIELD, 1980; MONTGOMERY e RUNGER, 2001).

2.4.2 Análise de variância (ANOVA)

A Análise de Variância (ANOVA) é uma metodologia estatística para testar se um determinado fator tem efeito significativo sobre a variável dependente Y . Supondo μ_j representando o verdadeiro valor da média da variável dependente classificada em diferentes níveis de um fator, significa que, para o nível j , a técnica de ANOVA testa a hipótese de que não existem diferenças entre as médias μ_j , assumindo que não há diferenças entre a variabilidade das observações em cada grupo (variância constante). Para mais detalhes sobre ANOVA, recomenda-se a leitura de Montgomery e Runger (MONTGOMERY e RUNGER, 2001).

2.4.3 Análise de regressão linear múltipla

O uso de modelos de regressão é fundamental para relacionar uma variável resposta conjuntamente a vários fatores que podem estar relacionados com essa resposta. Usualmente considera-se utilizar modelos de regressão linear, mas em algumas situações podemos ter modelos não lineares. A construção de modelos de regressão em geral é feita empiricamente, e cada modelo deve ser verificado em termos de ajuste por meio da análise dos resíduos. O uso de modelos de regressão permite identificar estatisticamente quais desses fatores (uso de

testes de hipóteses) afetam significativamente a resposta. Além disso, um modelo de regressão é usado para previsão futura da resposta dados os valores fixados das covariáveis (DRAPER e SMITH, 1981).

O método de regressão linear tem muitos usos práticos. A maioria das aplicações se enquadram em uma das duas seguintes grandes categorias:

- Se o objetivo é a predição ou previsão, modelos de regressão linear podem ser utilizados para ajustar um conjunto de dados observados de valores de Y em função de X . Após o ajuste de um modelo desse tipo, se um valor adicional de X é dado, então o modelo ajustado pode ser usado para fazer uma previsão do valor de y .

- Dadas as variáveis ou covariáveis X_1, \dots, X_p , que podem estar relacionadas com a resposta ou variável dependente Y , a análise de regressão linear pode ser utilizada para quantificar a magnitude da relação entre Y e X_j , $j=1, \dots, p$. Isso é dado por testes de hipóteses nos parâmetros de regressão.

Um exemplo de modelo de regressão com duas variáveis independentes é dado por:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \varepsilon_i \quad (1)$$

Para $i=1, \dots, n$ e ε_i , é um termo relacionado ao erro (variável não observada) suposto como uma quantidade aleatória. Este erro aleatório inclui todos os outros fatores que poderiam influenciar a variável dependente Y não incluídos no modelo de regressão. Os estimadores dos parâmetros de regressão usualmente são obtidos pelo método de mínimos quadrados.

2.4.4 Análise de regressão de *Poisson*

O modelo de regressão de *Poisson* tem por característica a análise de dados contados na forma de proporções ou razões de contagem, ou seja, leva em consideração o total de pessoas com uma determinada doença (McCULLAGH e NELDER, 1989).

A variável resposta de uma regressão de *Poisson* deve seguir uma distribuição de *Poisson* e os dados devem possuir igual dispersão, ou seja, a média da variável resposta deve ser igual à variância. Entretanto, conforme Ribeiro (2006), quando se trabalha com dados experimentais, esta propriedade é frequentemente violada. Assim, pode-se ter uma superdispersão quando a variância é maior que a média; ou uma subdispersão quando a variância é menor que a média (SCHMIDT, 2003).

2.5 Aplicações de eficiência de *poka-yokes*

Inúmeras implantações de *poka-yokes* foram observadas na literatura a respeito da avaliação da eficiência desses dispositivos à prova de erros, entre as quais foram selecionadas algumas no sentido de mostrar como têm sido relativamente utilizadas diferentes abordagens para essas métricas no cotidiano das organizações ao redor do mundo.

A seguir, serão apresentadas algumas propostas interessantes de validação de *poka-yokes* em diversos segmentos, tendo em vista que foi possível inferir que não há uma forma única de testar a validade de *poka-yoke*, sendo muitas abordagens corroboradas por meio de análises estatísticas variadas e outras por meio de monitoramento da redução dos erros nos processos de manufatura ou até mesmo dos registros de erros que foram evitados após a implantação de *poka-yokes*.

2.5.1 Teste aleatório de 100 peças para aceitação e validação de *poka-yoke*

Calarge e Davanso (2004) usaram um processo de aceitação e validação de dispositivo *poka-yoke* feito por meio de cem verificações de peças, sendo que devem ser consideradas, de forma aleatória, 10% de verificações em conformidade com o padrão especificado pelo cliente e 90% de verificações em não conformidade com as características estabelecidas em relação ao mesmo padrão citado. Assim, considera-se um dispositivo *poka-yoke* válido se ele conseguir detectar a totalidade de peças em não conformidade, impedindo que o erro se manifeste em defeito, em vez de atuar sobre as peças que estão em conformidade com as características controladas. Caso o dispositivo falhe nesse controle, o processo de validação é interrompido, faz-se uma análise para a detecção da causa da falha e a solução do problema, e se realiza outra validação do dispositivo.

2.5.2 Validação de *poka-yoke* por análises estatísticas de coeficiente de Pearson, regressão linear e ANOVA

Para uma validação quantitativa de uma técnica *poka-yoke*, Baseer et al. (2014) consideraram análise estatística para melhorar o desempenho na engenharia de *software*, cujo objetivo é reduzir o número de erros no desenvolvimento de um *software* chamado secretário pessoal, uma avaliação por meio de coeficiente de regressão e análise de variância (ANOVA).

A análise de regressão mostrou que a aplicação da técnica *poka-yoke* tem um impacto maior sobre a qualidade do *software*, cujo desenvolvimento se baseia em projetá-lo ao nível

de evitar paralisação do sistema, mesmo em face de eventual falha do sistema. Características de autosalvamento são um bom exemplo.

Por fim, o estudo realizado por Baseer et al. (2014) concluiu que indicadores de integração de *software* e métrica de obtenção do uso de metas em paralelo com análises estatísticas de coeficiente de *Pearson*, regressão linear e ANOVA mostraram linearidade e alta correlação justificando as hipóteses propostas de recomendação para o uso de *poka-yokes* no desempenho total do *software*.

2.5.3 Proposta de uma metodologia para avaliar dispositivos *poka-yokes*

Saurin et al. (2012) apresentam uma metodologia para avaliar os dispositivos *poka-yokes*, abrangendo tanto os projetados para o controle de qualidade quanto os destinados a controlar os riscos para a saúde e segurança no trabalho.

O método criado como forma de estrutura avalia os processos do desenho, a operação e a manutenção de *poka-yoke*, em vez de observar os resultados desses processos. O desenvolvimento do método envolveu três fases: (a) definição de 15 atributos de *poka-yokes*, identificando aqueles que fornecem características de falha de segurança (*fail-safe* - FS) e aqueles que informam as melhores práticas (*best practices* – BP) na concepção, implementação e manutenção; (b) definição sobre quais conjuntos e fontes de evidências devem ser concebidas para avaliar a existência de cada um dos atributos; as fontes incluem documentos, entrevistas, observações e uma reunião para discutir os resultados da avaliação com representantes da empresa; e (c) definição de um sistema de pontuação para expressar os resultados da avaliação. A aplicação da metodologia é ilustrada ao avaliar quatro *poka-yokes* espalhados em 3 empresas; dois deles se preocupam com a qualidade e dois com a segurança.

O desenvolvimento do método seguiu três etapas: (a) definição dos atributos de *poka-yokes*; (b) a definição de provas e suas fontes para avaliar a existência de cada atributo; (c) desenvolvimento um sistema de pontuação para expressar os resultados da avaliação.

Depois de concebido, o método foi testado avaliando quatro *poka-yokes* baseados em observações e uma entrevista com o gerente de qualidade ou com o engenheiro civil responsável no que tange à empresa de construção civil. As entrevistas que serviram como fontes de evidência para avaliar os atributos foram realizadas nas três empresas com os operadores das estações de trabalho que tinham *poka-yokes* instalados. A seguir, a figura 5 apresenta os resultados da avaliação de *poka-yokes* nas três empresas pesquisadas.

Figura 5 - Resultados da avaliação de quatro *poka-yokes* em três empresas pesquisadas

	FS1	FS2	FS3	FS4	FS5	FS6	FS7	FS8	M	BP1	BP2	BP3	BP4	BP5	BP6	BP7	M
PQ1	3,5	1	4	4	4	4	0	4	3,06	2	2	1	0	2	4	2	1,86
PQ2	1	2	4	4	4	2	0	0	2,12	2	2	1	0	2	4	2	1,86
PS1	4	4	4	4	4	4	0	1	3,12	4	2	2	0	NA	0	2	1,67
PS2	3	4	4	4	4	3,5	0	1	2,94	4	2	NA	2	NA	0	4	2,40

Notas: NA - Não aplicável; M - Média

Fonte: Saurin et al. (2012)

De acordo com a figura 5, nota-se que a média para os atributos que estão ligados a características de segurança contra falhas é maior do que a média com as melhores práticas.

Outro ponto de atenção desse estudo foi a comparação entre a qualidade e o *poka-yoke* de segurança indicando que as empresas não estavam cientes de suas semelhanças e, como consequência, elas não estavam se aproveitando de suas relações sinérgicas.

Neste estudo, Saurin et al. (2012), a título de exemplo prático, mencionam um dos *poka-yokes* pesquisados que consiste em uma máquina com três componentes primordiais:

1. Uma **correia transportadora**, que conduz as peças uma a uma na máquina;
2. Uma **câmera de vídeo**, dentro da máquina, que captura imagens de pastilhas de freio, a fim de comparar dimensões da peça com as dimensões do padrão de uma previamente catalogada;
3. Um **monitor** que mostra imagens comparativas entre o padrão e a pastilha de freio. Quando for detectada uma anormalidade sobre os ângulos e posições das pastilhas em desacordo com as especificações, o monitor exibe um **alerta visual** para o operador a fim de **remover a peça defeituosa**. Este operador é dedicado a esta operação, e está na frente do monitor, deixando apenas o local, a fim de remover o defeito de peças da linha de produção. A iniciativa de criar o *poka-yoke* deve-se ao grande número de reclamações de clientes sobre defeitos nas dimensões das pastilhas de freio (ver figura 6).

Figura 6 - Processo de aferição de pastilhas de freios por meio de câmera de visão artificial



Fonte: Saurin et al. (2012).

Na figura 6, da esquerda para a direita constam respectivamente as pastilhas de freio que entram na operação de fiscalização; visão externa da fonte da máquina de inspeção e acompanhamento, no canto superior direito; e a câmera captura imagens para comparar com o padrão.

2.5.4. Palmtop é avaliado para evitar erros médicos

Segundo Fialho et al. (2011), o uso de *poka-yoke* no processo de prescrição médica de uma clínica especializada na prevenção e no tratamento de doenças neoplásicas se inicia com o protocolo padronizado por patologia. O médico seleciona o tratamento por neoplasia, acrescenta peso e altura e o sistema já faz o cálculo da dosagem do medicamento que aparece na sequência correta, com os tempos de infusão de cada medicamento, com a data, nome e CRM (Certificado de Registro Médico). Além disso, existe um controle de dosagem máxima permitida, com o alerta para o médico. Por intermédio da parametrização do diluente dos medicamentos na prescrição padronizada, o sistema consegue avaliar a incompatibilidade medicamentosa.

Ao chegar à enfermagem, o paciente recebe uma pulseira com o nome e com a numeração da prescrição por meio de um código de barras. A enfermagem recebe o soro preparado pela farmácia com a numeração do código de barra na sequência da prescrição.

Antes de ter o processo automatizado, o profissional da enfermagem lia para o paciente o nome que estava no soro e só após a confirmação de que era realmente do paciente iniciava-se a aplicação. A sequência correta era lida na prescrição antes de fazer a aplicação. Com a nova sistemática, a checagem da aplicação da medicação é feita pelo *Palmtop*, aparelho que lê o código de barras. O enfermeiro passa o aparelho no código de barras do próprio crachá e em seguida passa o aparelho *Palm* na pulseira do paciente aguardando a mensagem do dispositivo com o nome do paciente e o medicamento a ser feito. Na sequência, o dispositivo lê o código de barras do soro e aguarda a mensagem de que o medicamento foi checado com sucesso. Caso não seja o medicamento correto, aparecerá no *Palm* a mensagem de que o medicamento não confere com a sequência da ordem ou ainda o número do medicamento não é igual ao da pulseira. Ao finalizar a medicação, o funcionário passa o *Palm* na pulseira do paciente para verificar se todos os soros foram feitos.

É importante salientar que o *Palmtop* registra quais os erros são identificados, tanto de alteração de ordem prescrita na administração, quanto de troca de medicamentos entre pacientes. O aparelho alerta o erro ao técnico de enfermagem, registra-o e somente após a verificação e correção do procedimento, permitirá o prosseguimento e rastreabilidade do

processo. Todo o procedimento de administração de medicamentos é rastreado pelo aparelho *Palmtop*, que indica também o número total de pacientes atendidos, por técnicos de enfermagem, bem como o índice de erros por funcionários.

Além dos índices registrados pelo *Palmtop* existem outros indicadores de performance acompanhados para cada funcionário, considerando o número de atividades exercidas por cada técnico de enfermagem levando em conta os procedimentos de punções venosas, limpeza de cateter, administração de medicamentos, alta do paciente, e organização do leito. Esses indicadores são calculados pelo número de atividades exercidas, considerando também um peso para cada procedimento.

Cada técnico no final do mês apresenta um indicador ou pontuação final, que será avaliada, juntamente ao seu índice de erros para análise de seu desempenho. Com a adoção dos procedimentos acima adotados e com a ferramenta de tecnologia para rastreabilidade do processo de administração de medicamentos, além de evitar a ocorrência de erros na administração medicamentosa, a clínica utiliza as informações coletadas pelos dispositivos *poka-yokes* para dar subsídios na alocação de seus recursos e pessoal e para a operacionalização do atendimento aos pacientes melhorando a produtividade do serviço prestado. Tudo isso fez com que no ano de 2010 a empresa obtivesse um indicador de 94% de pacientes muito satisfeitos. O presente método foi avaliado por meio de análise descritiva dos erros registrados que foram evitados e controlados durante o período de estudo dos dados.

Outro aspecto observado é que durante todo o ano de 2010 foi possível controlar o número de erros a serem evitados pelos atendentes, conforme relatado no quadro 3 abaixo:

Quadro 3 - Número de checagens e erros detectados pelo *Palmtop*

Mês	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov
Total de checagens	4318	4124	3873	3973	4064	4080	3809	3829	4028
Total de erros detectados pelo <i>Palm</i>	12	20	10	28	30	16	12	13	17
% de erros	0,35	0,48	0,26	0,73	0,74	0,39	0,32	0,34	0,42

Fonte: Fialho et al. (2011)

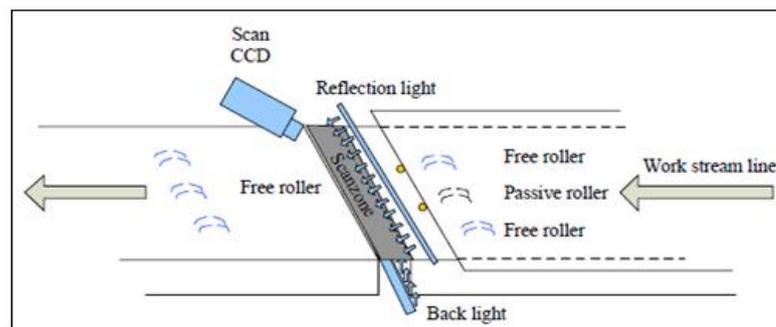
Os dados coletados no quadro 3 mostram claramente a eficiência da técnica *poka-yoke* utilizando um *Palm* que checa a medicação pré-determinada com o erro em potencial que pode ser evitado, graças ao uso de dispositivos *poka-yokes* apoiados na tecnologia de informação que, segundo Shahin e Ghasemaghahi (2010), além de reduzir erros e retrabalho,

auxiliam na melhoria da qualidade e conseqüentemente no aumento de produtividade em serviços.

2.5.5 Acuracidade na medição de defeitos de exibição da superfície de transistor de película fina de cristal líquido (TFT-LCD).

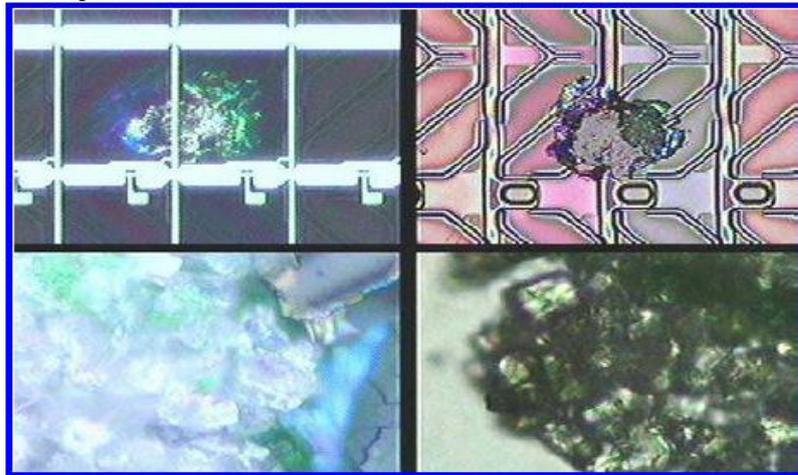
Chern-Sheng et al. (2011) relatam a aplicação de uma inspeção automática *on-line* e medição de defeitos de exibição da superfície de transistor de película fina de cristal líquido (TFT-LCD) no processo de revestimento de poliamida com um método de união de modelos modificados e rede neural de propagação. Para este processo de TFT-LCD, o substrato de produção da superfície precisa ser inspecionado em todas as etapas para garantir a qualidade e reduzir os defeitos. Para esta aplicação, a inspeção óptica foi o método usado para captar as condições da superfície de um produto acabado, e inspecionar os defeitos como manchas ou padrões anormais na superfície. Sem manusear o *software* manualmente, ao inspecionar uma imagem estática, a imagem é comparada com o banco de dados de modelos de modo que o defeito possa ser capturado instantaneamente em conformidade com os parâmetros de similaridade/caracteres de peso. A figura 7, a seguir, mostra o modelo de inspeção automática de defeitos que foi proposto neste caso concreto. Na seqüência, a figura 8 evidencia os defeitos como manchas ou padrões anormais na superfície catalogados no equipamento de inspeção.

Figura 7 - Hardware de inspeção automática de defeitos de superfície em processo de revestimento de painéis de cristal líquido



Fonte: Chern-Sheng et al. (2011).

Figura 8 - Visão microscópica do defeito.



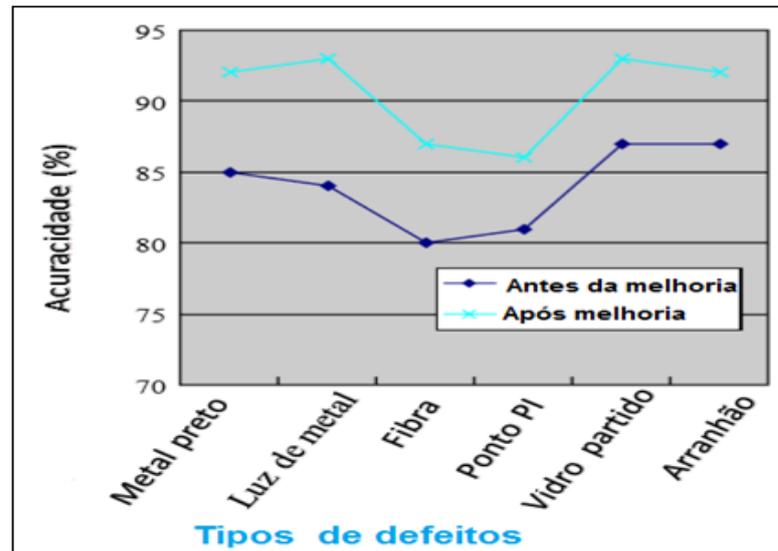
Fonte: Chern-Sheng et al. (2011).

Em termos de formação de exemplo, os princípios da rede neural artificial foram usados para instruir a taxa de detecção de erros da amostra. As imagens são inspecionadas 100 vezes para computar os tempos corretos de detecção e média de processamento. Cada tipo de defeito da amostra foi testado relativamente 100 vezes para gravar as acusações de detecção correta e o tempo de processamento; a eficiência do sistema foi comparada.

Após a inspeção de defeito ter sido feita, a análise estatística foi realizada para os dados de teste para a calibração e diagnóstico.

A figura 9 em seguida mostra uma comparação da capacidade de leitura de inspeção automática. A percentagem de falhas é 85 a 93% relativamente à classificação individual. Quando o sistema é aprimorado, a melhoria da função de 5 a 8% pode ser encontrada em termos de inspeção de um único defeito, sendo necessário menos tempo quando comparado com as técnicas tradicionais de inspeção. Os tipos de defeitos de fibra e pontos PI são mais difíceis para identificar de modo que as curvas têm forma semelhante, embora o processo de inspeção ter sido modificado. O tempo de detecção satisfatório e confiabilidade foram alcançados. Após a implementação, a taxa de rendimento na linha de produção foi consideravelmente melhorada.

Figura 9 - Antes e depois da melhoria da legibilidade em inspeção automática



Fonte: Chern-Sheng et al. (2011).

A técnica estatística de análise descritiva foi realizada para testar os dados de calibragem e de diagnóstico, o que pode manter um ambiente de funcionamento adequado e reduzir o custo de operação de alta velocidade do processo de inspeção automática para minimizar o tempo de julgamento do sistema na detecção de defeitos. Por fim, este foi um ótimo exemplo de como a estatística pode diagnosticar a melhora na taxa de acuracidade e eficiência para os tipos de defeitos testados por um *poka-yoke* de inspeção por câmera de visão artificial.

2.5.6 Monitoramento da eficiência das peças produzidas com a implantação do *poka-yoke*

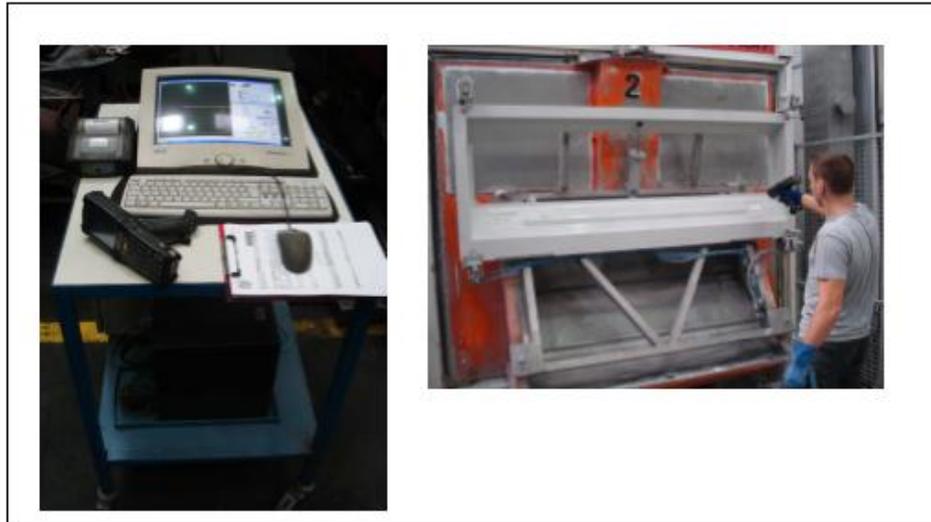
De acordo com Nogueira et al. (2010), um sistema de *poka-yoke* desenvolvido baseia-se na identificação dos produtos com uma etiqueta com código de barras para ser lida na máquina de corte por jato de água. Este sistema contra erros permite detectá-los, avisar o operador (AVISA) e também parar o processo de fabricação (PÁRA).

Esta solução exige a aplicação de dispositivos na operação de programação em CNC (comando numérico computadorizado) e na maquinação por corte de jato de água. Na primeira, liga-se um computador com uma impressora de modo a imprimir a laser as etiquetas com código de barras para serem coladas na peça em processamento pelo operador no final da operação. Depois de identificado, o componente é transportado e colocado na máquina de corte por jato de água. Nesta operação instala-se um leitor de código de barras por infravermelhos, sendo este acionado pelo operador antes do início da operação de corte.

Sempre que a referência do código de barras não corresponda à referência do programa de maquinação, a máquina não inicia o programa de corte, exigindo a intervenção do operador.

Na figura 10 apresentam-se imagens de detalhe do sistema e na figura 11 está representado o processo de fabricação com este dispositivo *poka-yoke* aplicado.

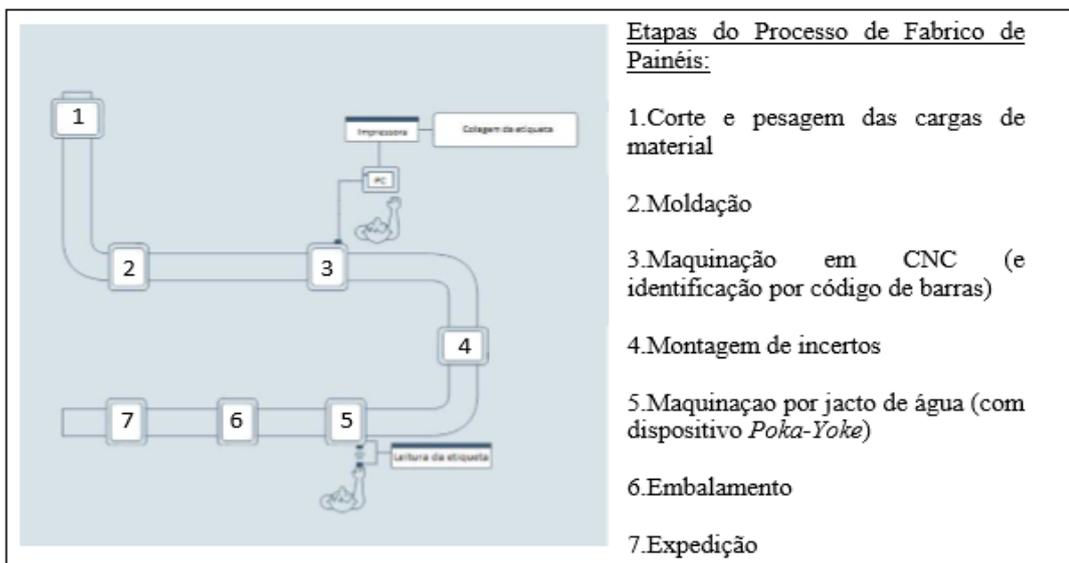
Figura 10 - Processo de monitoramento eletrônico do equipamento de corte por jato de água.



Fonte: Nogueira et al. (2010).

Com relação à figura 10, na imagem da esquerda observa-se a impressora a laser, o computador e o leitor de código de barras utilizados no sistema *poka-yoke*. Na imagem da direita, observa-se o operador a fazer a leitura da etiqueta antes da maquinação por jato de água.

Figura 11 - Esquema do fluxo de fabricação com o *poka-yoke* implementado



Fonte: Nogueira et al. (2010)

O sistema escolhido, descrito nas figuras 10 e 11, foi apresentado aos colaboradores diretamente envolvidos no processo em causa. O *feedback* foi muito positivo porque os operadores perceberam que os dispositivos contra erros facilitam a realização das operações, exigindo menor concentração e aumentando a sua eficácia.

Posteriormente, este projeto foi validado durante duas semanas de produção nas quais foram fabricadas 800 peças. O impacto foi avaliado por meio do número de não conformes. Os resultados obtidos (ver figura 12) avaliados por meio de análise descritiva mostraram que neste período não houve defeitos devido a maquinação errada por troca de referências.

Figura 12 - Peças produzidas com a implementação do dispositivo *poka-yoke*

Dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Peças Produzidas	70	58	47	57	60	45	47	70	65	51	42	60	62	54
Maquinação errada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Nogueira et al. (2010).

Diante dos resultados da figura 12, nota-se claramente que o *poka-yoke* teve sua eficiência validada por um simples acompanhamento com a produção de *zero defeitos*.

2.5.7. Rede bayesiana estimando confiabilidade em fabricação para dispositivos *poka-yokes*

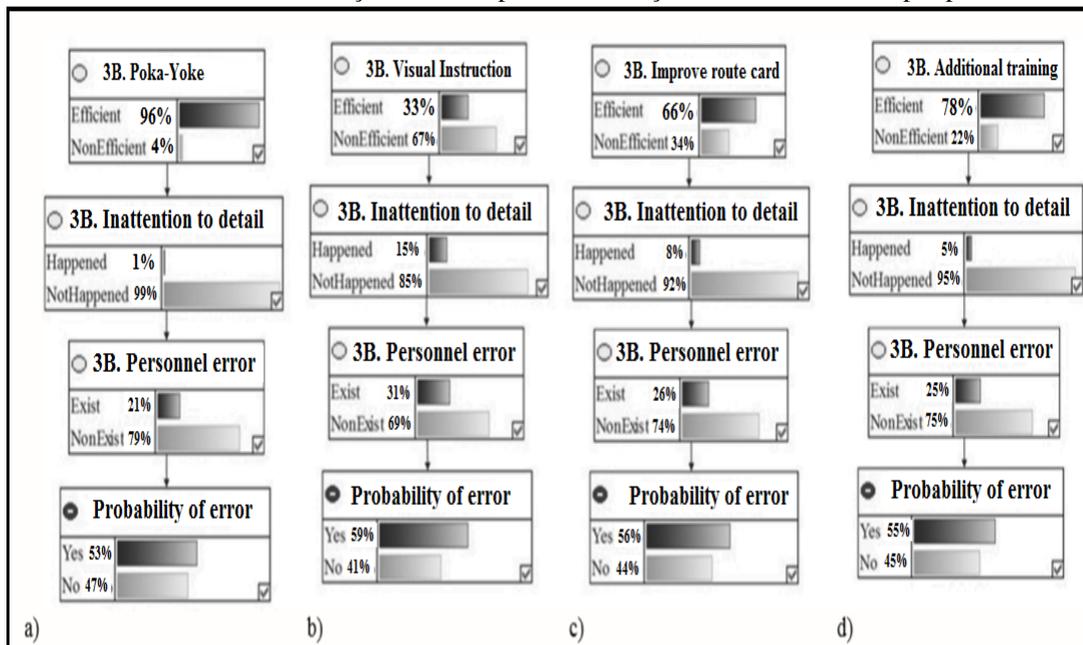
Kostina et al. (2012) desenvolveu um método de avaliação de confiabilidade para identificar as partes mais confiáveis de um processo de produção e sugerir os meios mais eficientes para a melhoria da confiabilidade da manufatura. Eles se basearam em uma rede bayesiana, um gráfico probabilístico por meio do qual se pode adquirir, capitalizar e explorar o conhecimento. Ela consiste em um conjunto de nós interconectados, em que cada nó representa uma variável no modelo de dependência e os arcos de conexões representam as relações causais entre essas variáveis. As redes bayesianas são as sucessoras naturais de abordagens estatísticas para inteligência artificial e mineração de dados. Uma rede bayesiana é um modelo gráfico que codifica relações probabilísticas entre as variáveis de interesse. Quando usado em conjunto com outras técnicas estatísticas, o modelo gráfico tem várias vantagens para análise de dados porque o modelo codifica dependências entre todas as variáveis, e facilmente lida com situações em que algumas entradas de dados estão em falta. Uma rede bayesiana pode ser utilizada para aprender relações causais, e, portanto, pode ser

usada para adquirir conhecimento sobre um domínio de problemas e para prever as consequências das relações probabilísticas entre as variáveis de interesse. Neste estudo de caso (considerado aqui apenas para exemplificar o uso de redes bayesianas para avaliação de *poka-yokes*, um tema que não será foco desta dissertação de mestrado) foram previstas quatro ações corretivas:

- (a) *Poka-yoke*;
- (b) A instrução visual;
- (c) Melhoria do cartão de rota;
- (d) Treinamento adicional;

De acordo com a figura 13, a análise mostra que o corretivo de ação mais eficaz para a eliminação de erros de pessoal foi a implementação de *poka-yoke*, com probabilidade de sucesso de 96%. De um lado o *poka-yoke* foi a decisão mais confiável do problema, mas de outro lado esta é a decisão mais cara também. No entanto, a decisão final sobre qual a ação corretiva será dada pela informação dos tomadores de decisão, considerando a análise, bem como os custos de cada ação e a política da empresa.

Figura 13 – Resultados da análise de ações testadas para a eliminação de erros cometidos por pessoas



Fonte: Kostina et al. (2012)

Da esquerda para a direita são mostradas as probabilidades posteriores de ações implementadas: a) *poka-yoke*, b) instrução visual, c) melhoria do cartão de rota d) treinamento adicional.

3 Metodologia de pesquisa e coleta dos dados

Essa seção está dividida em três subseções: classificação, amostra e procedimentos operacionais para a coleta de dados.

3.1 Classificação

Em linhas gerais pode-se classificar este trabalho como pesquisa aplicada, pois será validado dentro de uma empresa do setor metalmeccânico do interior de São Paulo, em que o interesse do autor está voltado para a compreensão dos processos que ocorrem em um contexto industrial.

Além disso, classifica-se também como pesquisa exploratória porque envolve a revisão bibliográfica e análise do estudo de caso na tentativa de buscar soluções para problemas, até então, insolúveis. O procedimento de pesquisa pode ser classificado como um estudo de caso, considerando que tem o objetivo de analisar o impacto de técnicas e ferramentas em um ambiente de aplicação real, a fim de validar resultados de uma pesquisa realizada (THIOLLENT, 1997).

Outros autores, entre eles, Yin (2001) conceitua um estudo de caso como uma investigação empírica que desvende um fenômeno contemporâneo dentro do seu contexto da vida real, especialmente quando os limites entre fenômeno e o contexto não estão claramente definidos na sua plenitude. Por sua vez, Hartley (1995) explica que o estudo de caso consiste em uma investigação detalhada que frequentemente utiliza dados coletados durante um período de tempo, de uma ou mais organizações, ou grupos provendo uma análise de contexto e de processos envolvidos.

3.2 Amostra

Para este estudo foi analisada uma amostragem de duas famílias de máquinas bem representativas, dentre cento e cinquenta famílias no total, que são mais as expedidas durante o ano, consideradas carros-chefes em quantidades vendidas pela organização. Como estratégia de implantação do dispositivo à prova de erros, as duas famílias de máquinas foram as pioneiras a passarem pelo processo de aferição de balança de precisão na tentativa de reduzir o índice de peça faltante no setor de embalagem. Essas famílias de máquinas com denominação 15 e 17 serviram de teste-piloto do novo processo produtivo.

3.3 Procedimentos operacionais para a coleta de dados

Para este estudo, alguns passos foram importantes para compreender a metodologia de pesquisa utilizada para a tratativa dos dados levantados para análise:

- ✓ O primeiro passo foi coletar os dados por meio do acesso aos relatórios do sistema corporativo da empresa;
- ✓ O segundo passo foi aplicar filtros específicos para a obtenção de peças faltantes sobre as duas famílias de máquinas mais representativas de vendas durante o período de 2011 e 2013.
- ✓ O terceiro passo compreendeu em executar a análise descritiva dos dados, ou seja, aplicar o diagrama de pizza e histograma de peças faltantes por ano de embalagem e por família de máquinas.
- ✓ O quarto passo foi aplicar o teste de hipótese de qui-quadrado por ano de embalagem para as contagens observadas e esperadas.
- ✓ O quinto passo consistiu em fazer a análise de variância(ANOVA) para a contagem de peças faltantes por máquinas e por família de máquinas. Nesta fase foi necessário realizar uma transformação dos dados de contagem para uma escala logarítmica ($\log(\text{contagem})$) a fim de obter um modelo adequado.
- ✓ O sexto passo executou a análise de regressão linear múltipla considerando os estimadores de mínimos quadrados.
- ✓ O sétimo passo fechou o ciclo de análise com a regressão de *Poisson*.
- ✓ O oitavo passo, por fim, concluiu sobre as correlações e linearidades entres as análises estatísticas efetuadas para este estudo, lembrando que todas as análises foram efetuadas por intermédio do MINITAB® Versão 16.

A análise detalhada e o tratamento dos dados coletados foram relatados na seção 5 deste trabalho.

4 Implementação e aplicação do dispositivo *poka-yoke*

Nessa seção serão apresentadas a descrição da empresa, a primeira e a segunda proposta de *poka-yokes*.

4.1 Descrição da empresa

O estudo de caso ocorreu em uma empresa do ramo metalúrgico que produz máquinas e equipamentos agrícolas, com portfólio de cerca de 150 linhas de máquinas variadas. Essa empresa possui cadeia de revendedores parceiros distribuídos por regiões tanto no mercado interno quanto no externo, tendo em vista que exporta para mais de 70 países. A estrutura multinível de engenharia do produto atinge entre 500 e 6.000 itens, dependendo do modelo e tamanho de cada máquina. Como estratégia de logística de carregamento, a indústria adotou uma sistemática de não montar totalmente algumas linhas de produtos dentro do parque fabril, e nesse caso, esses produtos finais são enviados totalmente desmontados ao cliente final.

Diante disso, a empresa necessita enviar as embalagens com *kits* de peças intermediárias para que a montagem do produto seja feita com sucesso. Um técnico regional dos revendedores é deslocado até o cliente para a montagem final do equipamento que necessita de peças intercambiáveis que são enviadas dentro das embalagens de caixa de madeira ou saco plástico, conforme a necessidade de cada produto vendido. Diante do exposto, é fundamental que dentro das embalagens enviadas por *kit* não falte nenhuma peça, sob pena de não montar a máquina no destino final, causando enormes prejuízos à empresa, além de ocasionar indesejados aborrecimentos aos clientes.

4.2 A primeira proposta de *poka-yoke* por gabarito em EVA

Corria o ano de 2011 e a produção estava aumentando paulatinamente próxima à sua capacidade plena, porém a quantidade de peças faltantes nas embalagens estava alcançando níveis alarmantes. A meta estimada de erros pela equipe da pós-venda era traçada na ordem de 1,25% do total de produtos produzidos e, de fato, mês a mês vinha oscilando entre 1,7% e 2,2%, muito acima do teto estipulado pela organização. Após a implantação do dispositivo *poka-yoke* para as duas primeiras famílias de produtos, o índice de quantidade de peças faltantes foi zerado.

Diante do quadro de tantas reclamações, a empresa escalou um time de *Green Belts* para iniciar os estudos para eliminar o problema de peças faltantes nas embalagens enviadas

aos clientes finais. A equipe formada por três colaboradores deu início ao estudo proposto e utilizou a metodologia DMAIC que é um método de resolução de problemas dividido em cinco etapas: **Define** (Definir), **Measure** (Medir), **Analyze** (Analisar), **Improve** (Melhorar) e **Control** (Controlar). Este método começou a ser difundido pela Motorola na década de 80 do século passado e foi massificado pela GE dentro do programa Seis Sigma, que forma especialistas (conhecidos como **Black e Green Belts**) empenhados em resolver problemas de maneira organizada, e com apoio de ferramentas de qualidade e estatísticas mais sofisticadas.

Seguindo os passos da metodologia DMAIC, a equipe começou o processo de definição do problema no setor de embalagem. Percebeu-se que era preciso melhorar o processo de contagem das peças. Dois colaboradores embalavam cerca de 70 embalagens ao dia e contavam com um *check-list* do romaneio de despacho, uma espécie de lista de peças a serem embaladas para um determinado produto vendido. Tudo era feito de forma manual, não havia dupla checagem das peças e toda a confiabilidade de embalar corretamente era depositada no colaborador.

Depois de 90 dias de estudos, a equipe chegou a uma solução por meio de um *poka-yoke* da estrutura das peças desenhadas num quadro de EVA, em português, é a sigla de Espuma Vinílica Acetinada, escolhida para coincidir com a do nome técnico de sua matéria-prima, *Ethylene Vinyl Acetate*. É feita de um material termoplástico, uma espuma sintética de custo acessível muito usada para produtos infantis e material escolar, conforme mostra a figura 14:

Figura 14 - *Poka-yoke* de gabarito da estrutura de máquina.



Fonte: Elaboração Própria.

Depois de testar o *poka-yoke* no processo, perceberam-se mais problemas do que soluções. Dentre os principais destacavam-se a dificuldade de colocar as peças no quadro, a perda de agilidade no processo de embalagem (por e retirar as peças), a manutenção do quadro caso houvesse alguma mudança de peças pela Engenharia, a armazenagem e a localização correta dos quadros em armários, e principalmente a falta de rastreabilidade da embalagem como contraprova em caso de reclamação de clientes por peça faltante. Em suma, o primeiro estudo de *poka-yoke* teve muita resistência para ser implementado.

4.3 A segunda proposta de *poka-yoke* digital

Diante das dificuldades encontradas para a implementação da primeira proposta de *poka-yoke*, o autor deste trabalho iniciou uma pesquisa via internet para saber se havia alguma solução integrada para gerenciamento de pesagens e contagens de peças por meio de balança de precisão. As soluções de problemas encontrados na primeira proposta deveriam ser sanadas com esta nova tecnologia.

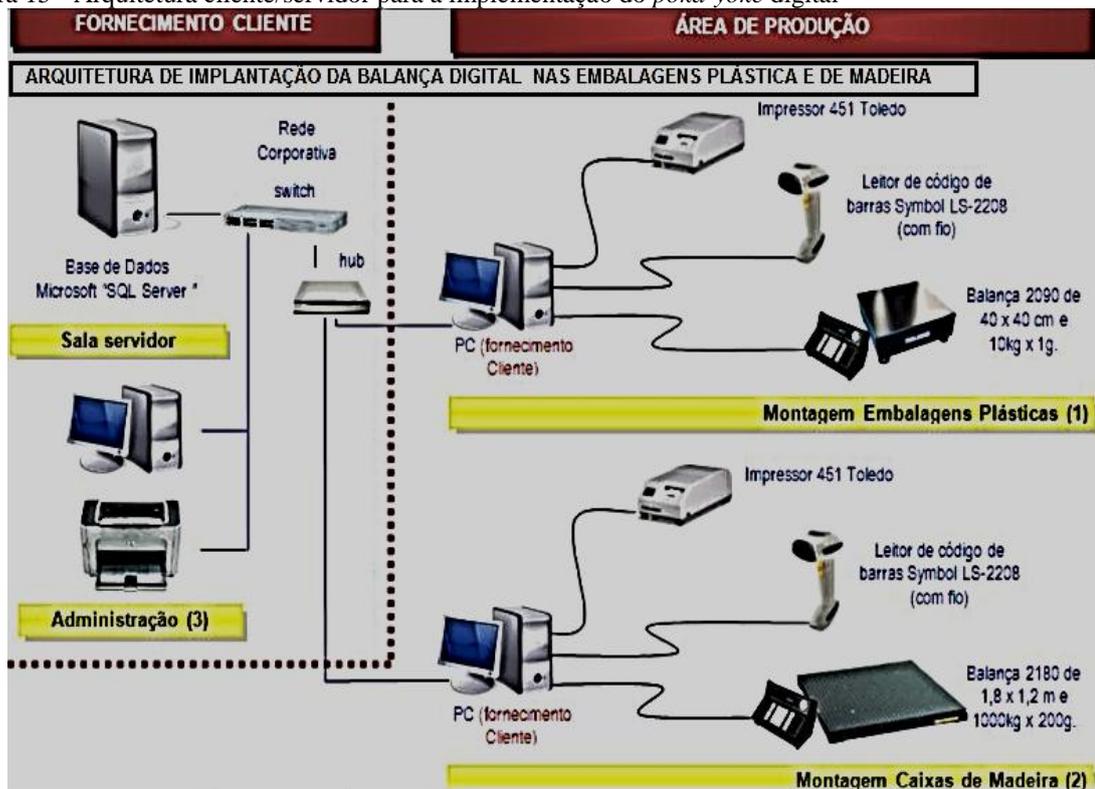
Depois de contatada a empresa TOLEDO que detinha a solução de pesagens digitais, foi cogitada a ideia de divulgar o projeto ao Diretor Industrial naquela ocasião.

Por meio de e-mail, foi apresentada a potencial solução e o diretor industrial, no dia seguinte, chamou este autor para dizer que estava autorizado para dar prosseguimento nos testes com a balança digital no setor de embalagens. A balança foi testada sem ônus para a empresa por um período de trinta dias e, por conseguinte, detectou muitos erros de contagem do embalador, sendo que num único dia foram constatados 9 erros de 72 embalagens feitas, ou seja, 12,5% de erros apontados pelo processo de balança de precisão. Este episódio chamou a atenção da gerência de produção que acabou remanejando o colaborador daquele setor.

Nesse contexto, o teste foi aprovado pela alta gestão da empresa e a partir daí começou o processo de implantação do *poka-yoke* digital, sendo de extrema relevância ressaltar o aprendizado que a organização teve com o primeiro estudo proposto por meio do quadro da estrutura do produto em material de EVA. Houve oportunidade de melhoria e nasceu, a partir disso, uma nova concepção de evitar a peça faltante nas embalagens enviadas ao cliente final.

Foi proposta uma arquitetura cliente/servidor em que as duas balanças, tanto para atender às embalagens de saco plástico quanto às de caixa de madeira fossem interligadas via rede a um servidor central, conforme mostra a figura 15.

Figura 15 - Arquitetura cliente/servidor para a implementação do *poka-yoke* digital



Fonte: Elaboração Própria

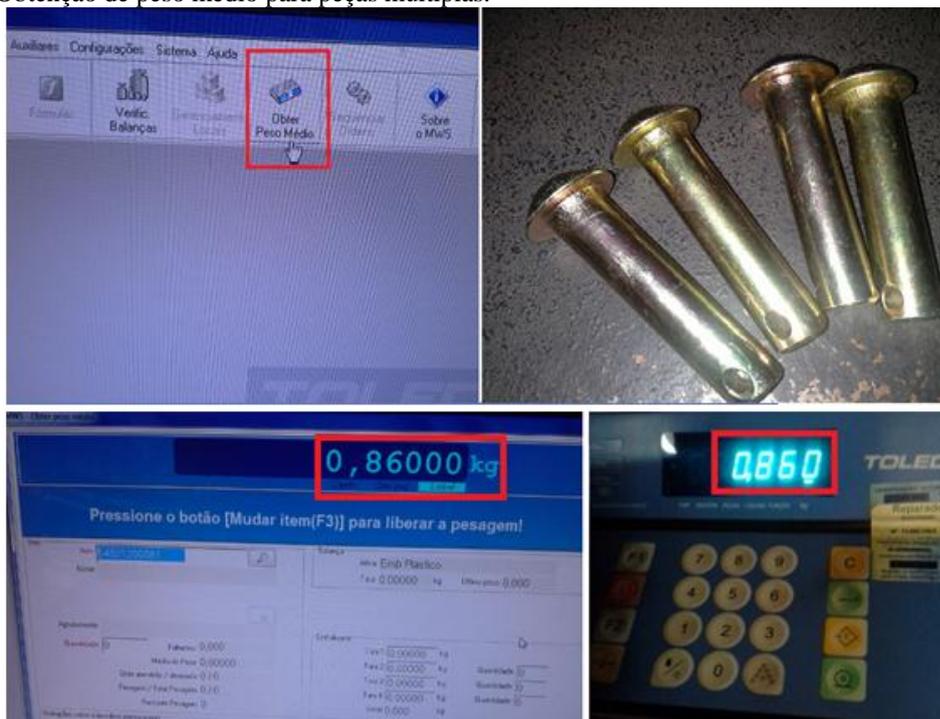
A balança de precisão das embalagens plásticas modelo 2090 tem capacidade de 10kg e incremento de 1g. A menor pesagem de peça aferida no sistema MWS (*Move Weigh System*) atinge 1g, porém a quantidade desse tipo de peça está entre 4 e 80 unidades, vale ressaltar que não há risco de ocorrer algum tipo de falha na pesagem da respectiva peça. A balança das caixas de madeira modelo 2180 tem capacidade de 1.000 kg e incremento de 200g. Para esse modelo de balança, nenhuma peça é destinada a ele com pesagem unitária menor do que 200g, sendo possível o sistema MWS ser parametrizado para pesar peça unitária ou em lote (peças), conforme o caso específico. Vale destacar que não há possibilidade de ocorrer alguma falha na pesagem da respectiva peça, sempre respeitando a tolerância para cada tipo de peça.

Para o projeto foram adquiridos dois leitores ópticos, duas impressoras térmicas, duas balanças (uma até 10 kg, modelo 2090, para embalagens de saco plástico e outra até 1.000 kg, modelo 2180, para embalagens de caixa de madeira), um servidor, dois microcomputadores e o banco de dados *SqlServer*. Com relação ao *software*, foi adquirido o sistema MWS – *Move Weigh System* – que permite interações com o ERP (*Enterprise Resource Planning*) corporativo por meio de arquivos textos importados para o seu sistema com definições claras de tabelas para ordem, lista, item e embalagem.

Uma vez montada toda a infraestrutura, em março de 2012 foi dada a largada para as primeiras pesagens, baseadas num estudo feito entre os produtos mais vendidos como estratégia de implantação, os chamados carros-chefes de vendas, cujo objetivo era reduzir o mais rápido possível o índice de peças faltantes.

O procedimento se iniciou com uma aferição no processo da balança de todas as peças da lista de engenharia do *kit* de embalagem. Cada peça foi pesada individualmente no sistema MWS por meio de obtenção do peso médio das peças com mais de uma unidade, conforme mostra a figura 16, e com o peso individual com tolerância de pesos quando se tratar de uma unidade única. Para peça unitária, de acordo com a figura 17, por prática é estabelecida uma tolerância mínima de 3% para mais ou para menos no cadastro do item para dar margem na conversão de pesos entre unidades, pois nem sempre as peças vêm com a mesma medida padrão entre os lotes, disso decorre a necessidade de estabelecer o grau de tolerância desde que não ultrapasse o peso de uma unidade para mais ou para menos.

Figura 16 - Obtenção de peso médio para peças múltiplas.



Fonte: Elaboração Própria

Figura 17 - Cadastramento das tolerâncias para peças unitárias.

The screenshot displays the 'VWS - Cadastro de itens' interface, divided into two main sections for item configuration.

Top Section (Item Overview):

- Item: 51380100065
- Nome: CHAVE P/PORCA SEXTAVADA 1.5/8"
- Item Type: Produto acabado
- U M controle: un (checked as 'Unidade da Faixa')
- Fator de Conversão: 4,40000 kg
- Peso bruto padrão: kg
- Quantidade padrão: un
- U M Peso: kg (checked as 'Unidade da Faixa')
- Obrigatório: Sim (checked)
- Quantidade para obtenção do peso médio: un

Bottom Section (Faixas de Peso - Weight Ranges):

- Item: 51380100065
- Nome: CHAVE P/PORCA SEXTAVADA 1.5/8"
- Item Type: Faixas de Peso
- Faixas de Peso: 4,4
- Peso Padrão: 4,4 un
- Minimo: 4,268 un (with a 3% tolerance box)
- Máximo: 4,532 un (with a 3% tolerance box)

Arrows indicate the flow from the 'Faixas de Peso' section to the 'Minimo' and 'Máximo' values.

Fonte: Elaboração Própria

Durante o processo de embalagem é necessário ter em mãos o romaneio de embarque, conforme mostra a figura 18 a seguir, um documento que é impresso a cada embalagem. Com posse desse documento, o embalador faz a coleta das peças de acordo com a ordem (classificação) de carga, ou seja, para a caixa de madeira há uma ordem pré-estabelecida no cadastramento do item para cada peça dentro da caixa, com o objetivo de acomodação geral, evitando que uma peça mais pesada sobreponha uma mais leve, danificando-a. Em qualquer tipo de embalagem, durante a classificação das peças é observado se uma peça se aproxima de outra com a mesma pesagem para mudar de posição, evitando que operador troque uma pela outra no momento de aferição na balança. No próprio documento é mostrada a imagem de uma balança, uma forma de gestão visual para saber com antecedência que aquela embalagem já foi aferida no processo de pesagem e está preparada para passar pela aferição eletrônica.

Figura 18 - Romaneio de embarque para coleta de peças nos depósitos.

ABC		LISTA ROMANEIO DE EMBARQUE	PEDIDO 60.298.120	Seq.Item Ped. 1			
CLIENTE: XXX		PRODUTO: AAABBBCCC					
50921306560		CX COMPONENTES PICRI-16 DISCOS					
				Sequência / Qt. total Pedido 1 / 1			
60298120001001M							
IT	QTD	DESCRICAO	UN	CODIGO PEÇA	KB	C.CUSTO FABRICANTE	ORDEM
001	1	CAIXA VAZIA C.1000MM X L.450MM X A.250MM	PC	60.20.05.1007.3			1
002	4	LIMPADOR TRASEIRO 2.12" X 5/8"	PC	53.52.05.0030.4	021960	- Estampaña	2
003	4	LIMPADOR DIANTEIRO 2.12" X 5/8"	PC	53.52.05.0031.2	021960	- Estampaña	3
004	2	CUBO DO EIXO DE ARTICULACAO	PC	52.04.03.0001.5	024200	- C.N.C.(Galaxy)	4
005	1	SUPORTE DA BARRA ESTABILIZADORA (640MM)	CJ	55.30.14.0010.0	021180	- Solda Sub.Conj.P.Solo	5
006	1	CHAVE P/PORCA DE 1.5/8"	SC	51.38.01.0019.7	022500	- Tracao Animal	6
007	1	CHAVE P/PORCA SEXTAVADA 1.5/8" E 1"	SC	51.38.01.0007.3	022500	- Tracao Animal	7
008	1	TRAVA DO PISTAO DE 360MM	PC	55.58.04.0009.3	021940	- Corte Laser	8
009	1	CHAVE "L" P/PORCA SEXTAVADA 5/8" - 3/4"	CJ	51.38.05.0016.0	022500	- Tracao Animal	9
010	1	PINO C/PUXADOR DE 01.114" X 215MM	SC	54.32.01.0025.1	022500	- Tracao Animal	10
011	1	VARAO ESTABILIZADOR COMPLETO(565MM)	CJ	55.66.01.0026.0	021810	- Embalagem	11
012	4	PARAFUSO CAB.SEXTAVADA 1" X 7" 8F UNC1A GR5 RP(BICROMATIZADO)	PC	60.20.31.1140.4			12
013	2	PARAFUSO CAB.SEXTAVADA 1.1/4" X 7" 7F UNC1A GR5 RP(BICROMATIZADO)	PC	60.20.31.1156.0			13
014	1	SUPORTE DAS MANGUEIRAS	CJ	55.30.06.0020.3	022500	- Tracao Animal	14
015	1	CILINDRO HIDRAULICO "D.A" Ø1.5/8" X Ø3.1/2" X 358MM(CURSO) X 689MM(FECHADO)	CJ	54.36.01.0227.3	021640	- Montagem Hidráulica	15
016	1	MANGUEIRA Ø3/8" X 6000MM COM 1TCG E 1TRF C/ENGATE RAPIDO MACHO	SC	53.72.02.0133.6	021420	- Montagem Final	16
017	1	MANGUEIRA Ø3/8" X 6400MM COM 1TCG E 1TRF C/ENGATE RAPIDO MACHO	SC	53.72.02.0134.4	021420	- Montagem Final	17
018	1	EMBALAGEM PLASTICA CPL CRI-16 DISCOS	PC	52.34.01.0289.4	021810	- Embalagem	18

Fonte: Elaboração Própria

Para as peças da embalagem de madeira foi criado um carrinho robusto para suportar peças com pesos variados entre 200g até 30 kg. Já para a embalagem plástica, foi desenvolvido um modelo de carrinho numerado de 1 até 100, seguindo a ordem dos itens estabelecida no romaneio no qual cada caixinha KLT(transporte de pequenas cargas) possa ser, facilmente, acoplada e desacoplada para despejarem as peças até 200 g por unidade sobre a balança.

Uma vez colocadas as peças nos carrinhos mostrados na figura 19 a seguir, eles são encaminhados até o ponto de uso de aferição de cada balança apropriada, conforme mostra a figura 20 a seguir.

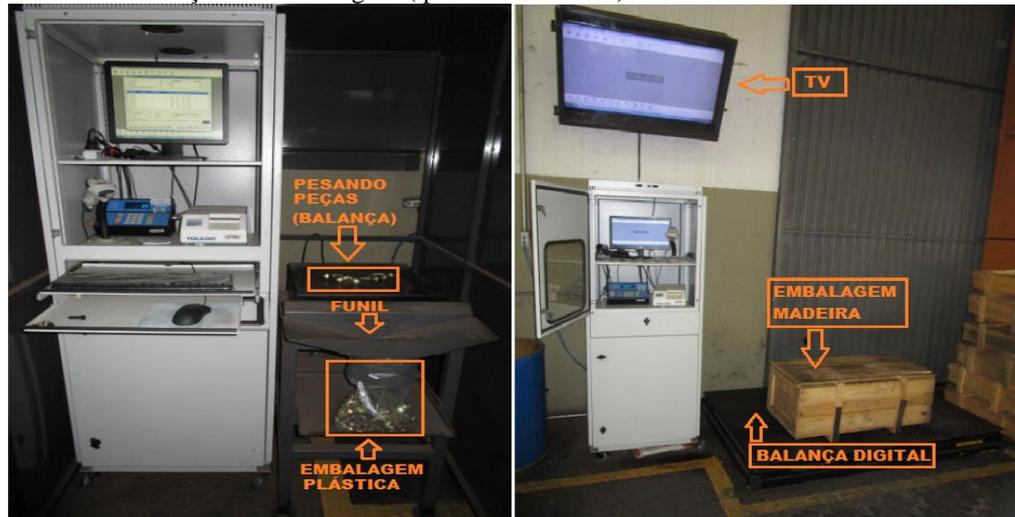
Figura 19 - Carrinhos transportadores das peças que serão aferidas na balança digital.



Fonte: Elaboração Própria

Para a embalagem de caixa de madeira, foi instalada uma TV de 40 polegadas com replicação de imagem pelo monitor do microcomputador, cujo intuito é auxiliar a visão do embalador para dar sequência na pesagem das peças sem ter que recorrer à tela do monitor convencional do micro.

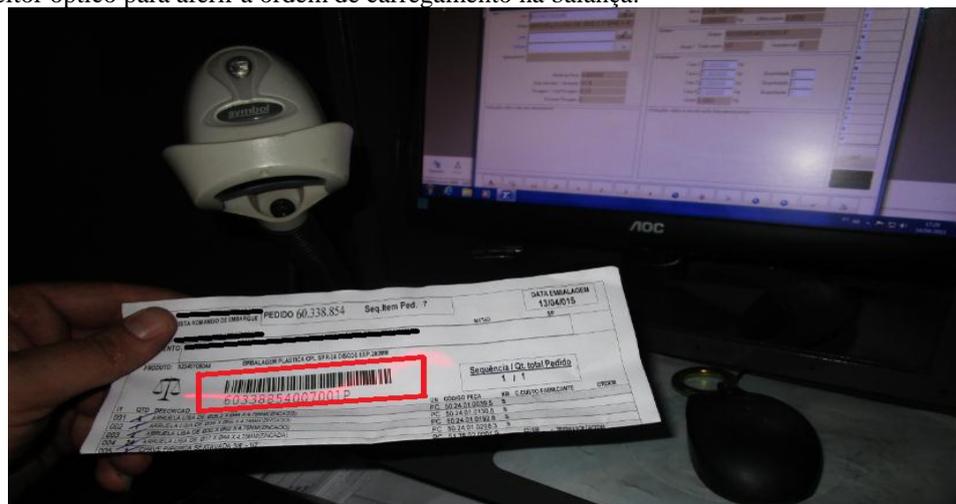
Figura 20 - Pontos de uso de aferição das embalagens (plástica e madeira).



Fonte: Elaboração Própria

Quando o carrinho de peças chega ao ponto de aferição, o romaneio de embarque é lido por meio de um leitor óptico para mostrar automaticamente a tela de entrada da ordem de carregamento para ser aferida na balança, de acordo com a figura 21, a seguir.

Figura 21 - Leitor óptico para aferir a ordem de carregamento na balança.



Fonte: Elaboração Própria

Para as peças até 200 g que passam pela embalagem plástica, foi desenvolvido um funil acoplado ao lado da balança com o objetivo de escoar as peças para dentro do saco plástico, visando a facilitar o manuseio da embalagem, conforme mostra a figura 22, a seguir.

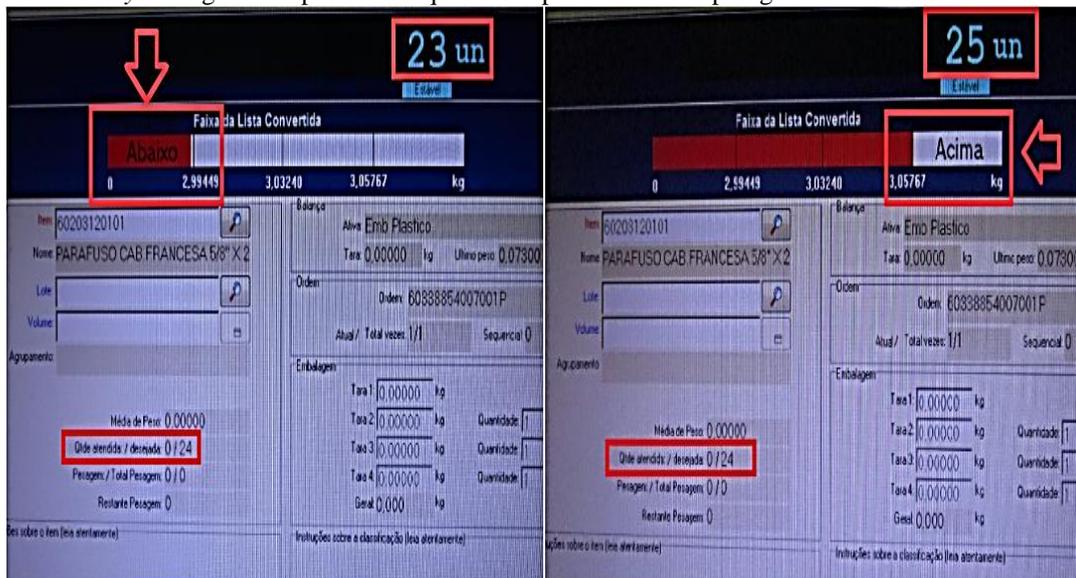
Figura 22 - Funil de escoamento de peças miúdas na embalagem plástica.



Fonte: Elaboração Própria

O sistema MWS, a cada peça aferida, avança automaticamente para a próxima peça na sequência. Caso a quantidade esperada não estiver correta, o sistema não permite passar de fase até que a quantia esteja adequada na balança. Os erros indicados na figura 23 ficam aguardando o operador inserir ou retirar a peça, conforme o caso. No exemplo prático, a quantia desejada é de 24 unidades de parafusos, porém ao retirar um ou colocar um a mais, o sistema paralisa o processo com sinal de advertência, impedindo de seguir adiante a pesagem total.

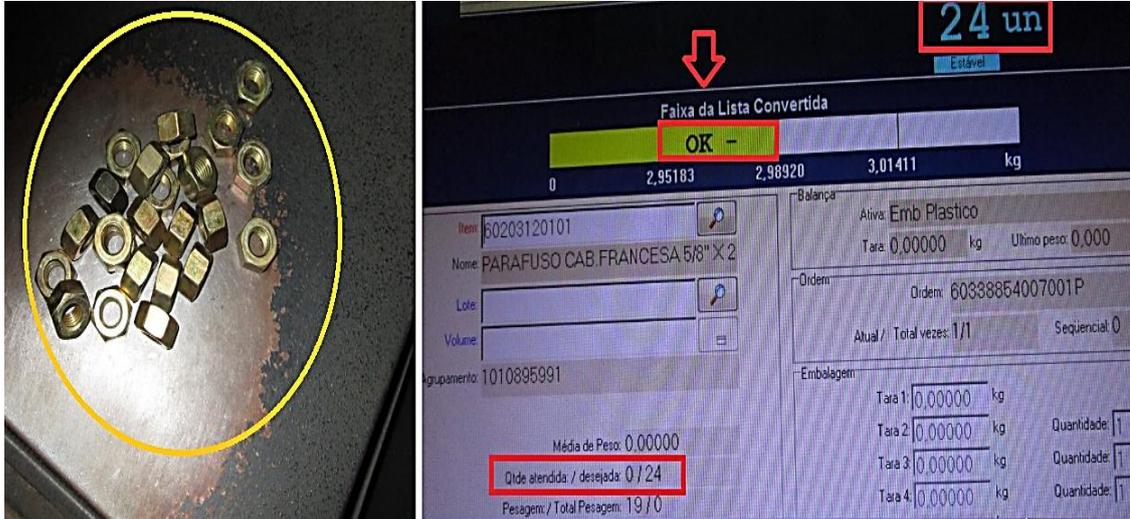
Figura 23 - Poka-yoke digital comparando as quantias esperadas com as pesagens reais.



Fonte: Elaboração Própria

Uma vez corrigida a quantidade, o sistema emite um sinal de OK, conforme a figura 24 e passa para a peça seguinte automaticamente e assim sucessivamente.

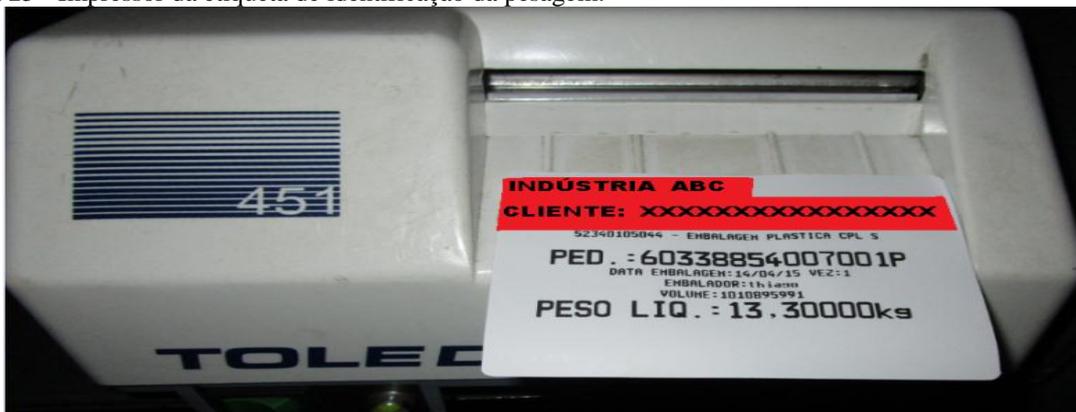
Figura 24 - Poka-yoke digital liberando a quantidade de peças esperadas na balança.



Fonte: Elaboração Própria

Ao término da última peça pesada, o sistema emite automaticamente uma etiqueta que serve para a rastreabilidade da embalagem aferida na balança de precisão, conforme mostra a figura 25.

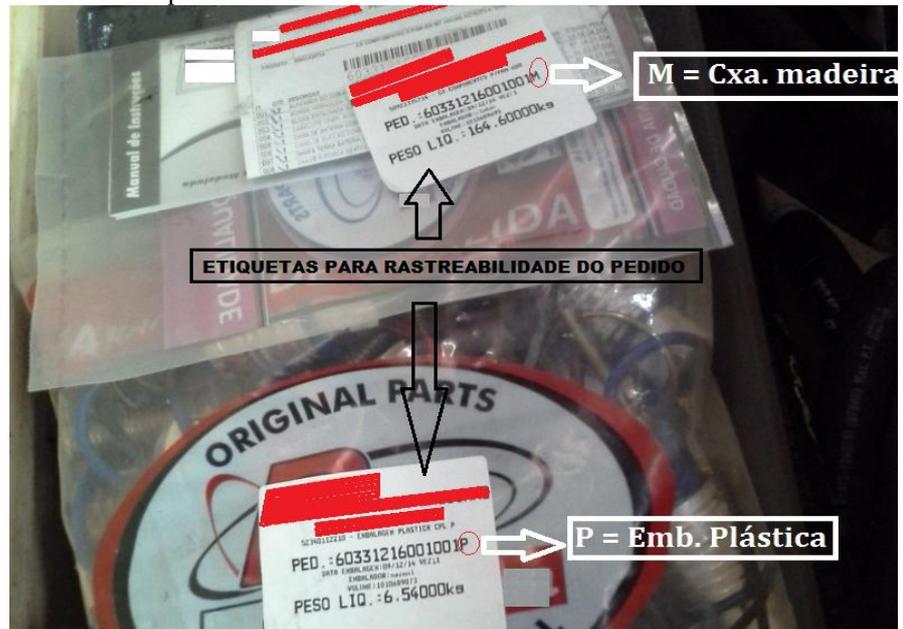
Figura 25 - Impressor da etiqueta de identificação da pesagem.



Fonte: Elaboração Própria

As etiquetas emitidas pelo MWS são coladas ao lado externo dos saquinhos plásticos que ficam dentro da caixa de madeira, conforme mostra a figura 26. Quando o número de série terminar com M, trata-se de embalagem de madeira, caso seja finalizado com P, trata-se de embalagem plástica.

Figura 26 - Etiquetas coladas no saco plástico dentro da caixa de madeira.



Fonte: Elaboração Própria

A seguir, a figura 27 mostra uma caixa de madeira antes de ser fechada. Depois de concluída a fase de pesagem, a caixa de madeira é fechada e lacrada.

Figura 27 - Vista de uma caixa de madeira completa.



Fonte: Elaboração Própria.

Em se tratando de reclamação de cliente devido a peça faltante, o sistema possui rastreabilidade total da embalagem aferida pela balança de precisão, separando a caixa de

madeira (com final M) e a embalagem plástica (com final P), conforme a embalagem reclamada, como mostra o modelo representado na figura 28.

Figura 28 - Rastreabilidade do pedido conferido por balança de precisão.

Rastreabilidade do pedido - Movimentos Balança									
Cod. Item	Descrição do item	Seq. Mov.	VOLUME	QTD.MOV.	DT.MOV.	HOR.MOV.	CARREGADOR	PESO LIQ.	TIPO EMB.
Número de Ordem: 60333007010001M									
60200510073	CAIXA VAZIA C.1000MM X L.450MM X A.250MM	1	1010704614	1	17/12/2014	09:40	anderson	16,600	Emb. Madeira
53520500398	LIMPADOR DIANTEIRO (2.1/2" X 5/8" C/FURO OBLONGO)	2	1010704614	5	17/12/2014	09:42	anderson	15,600	Emb. Madeira
53520500401	LIMPADOR TRASEIRO (2.1/2" X 5/8" C/FURO OBLONGO)	3	1010704614	5	17/12/2014	09:42	anderson	15,400	Emb. Madeira
52040300015	CUBO DO EIXO DE ARTICULACAO	4	1010704614	2	17/12/2014	09:43	anderson	15,200	Emb. Madeira
55301400291	SUPORTE DA BARRA ESTABILIZADORA (ESPECIAL)	5	1010704614	1	17/12/2014	09:43	anderson	13,600	Emb. Madeira
51380100197	CHAVE P/PORCA DE 1.5/8"	6	1010704614	1	17/12/2014	09:44	anderson	4,800	Emb. Madeira
51380100073	CHAVE P/PORCA SEXTAVADA 1.5/8" E 1"	7	1010704614	1	17/12/2014	09:44	anderson	5,200	Emb. Madeira
55580400255	TRAVA DO PISTAO DE 348MM	8	1010704614	1	17/12/2014	09:45	anderson	2,600	Emb. Madeira
51380500160	CHAVE "L" P/PORCA SEXTAVADA 5/8" - 3/4"	9	1010704614	1	17/12/2014	09:45	anderson	2,800	Emb. Madeira
54320600238	PINO C/PUXADOR DE Ø1" X 210MM	10	1010704614	1	17/12/2014	09:45	anderson	1,400	Emb. Madeira
55660100260	VARAO ESTABILIZADOR COMPLETO(565MM)	11	1010704614	1	17/12/2014	09:45	anderson	4,400	Emb. Madeira
60203111048	PARAFUSO CAB.SEXTAVADA 3/4" X 5.1/2" 10F UNC1A GR5	12	1010704614	3	17/12/2014	09:46	anderson	1,000	Emb. Madeira
60203111390	PARAFUSO CAB.SEXTAVADA 1" X 6.1/2" 8F UNC1A GR5 RP	13	1010704614	2	17/12/2014	09:46	anderson	1,800	Emb. Madeira
55300600203	SUPORTE DAS MANGUEIRAS	14	1010704614	1	17/12/2014	09:46	anderson	1,000	Emb. Madeira
54360102281	CILINDRO HIDRAULICO "D.A" Ø1.5/8" X Ø3.1/2" X 340MM	15	1010704614	1	17/12/2014	09:47	anderson	20,800	Emb. Madeira
53720201280	MANGUEIRA Ø3/8" X 5300MM COM 1TCG E 1TRF C/ENGATE	16	1010704614	1	17/12/2014	09:48	anderson	2,200	Emb. Madeira
53720201328	MANGUEIRA Ø3/8" X 5700MM COM 1TCG E 1TRF C/ENGATE	17	1010704614	1	17/12/2014	09:48	anderson	1,800	Emb. Madeira
52340131282	EMBALAGEM PLASTICA CPL CRSG-16 DISCOS	18	1010704614	1	17/12/2014	09:49	anderson	18,800	Emb. Madeira
Totais:		Qtd. Movimentada:		30	Peso:		145,000 KG		

Fonte: Elaboração Própria

5 Modelagem e resultados

Essa seção compreende a modelagem estatística com os respectivos resultados por meio de análise descritiva, de variância (ANOVA), de regressão linear múltipla e de regressão de *Poisson*.

Há duas finalidades para análise estatística:

- ✓ Comprovar que o uso de *poka-yoke* levou a um decréscimo no número de peças faltantes enviadas para cada cliente;
- ✓ Com os dados coletados, também foram verificados se alguns fatores contribuíam de forma significativa para a variabilidade do número de peças faltantes antes do

uso de *poka-yoke*. Apesar do uso de *poka-yoke* ter levado a uma solução satisfatória para a indústria (o objetivo principal desse estudo em termos de eficácia), foram analisados, como objetivo secundário, os dados usando modelos de regressão para previsão e detecção de alguns fatores que afetavam a variabilidade de peças faltantes em cada embalagem enviada para os clientes, observando que ao deparar com dados de contagem condiciona à necessidade de usar modelos de regressão para dados de contagem.

As reclamações dos clientes, de uma empresa do setor metalúrgico para equipamentos agrícolas localizada no interior do Estado de São Paulo, relativas às peças faltantes nas embalagens recebidas da indústria foi anotado entre os anos de 2011 e 2013. Nesse período de 3 anos foi observado que 462 unidades não foram recebidas pelos clientes. Para este estudo foi analisada uma amostragem de duas famílias bem representativas de produtos que são mais expedidos durante o ano, considerados carros-chefes em quantidades vendidas pela organização. Após o ano de 2011 alguns procedimentos foram implementados pela empresa para minimizar essas remessas com peças de diversos tipos faltantes. A subseção 4.3 deste trabalho relata toda a trajetória da implementação do *poka-yoke* que foi a balança de precisão no processo de embalagem. Em março de 2013, definitivamente a balança de precisão foi instalada e as primeiras embalagens de duas famílias bem representativas foram as primeiras a passar pelo processo de aferição por meio da balança de precisão digital. Há dois tipos de embalagens, um saco plástico para embalar o *kit* de peças miúdas até 200g e uma caixa de madeira para embalar peças com peso maior que 200g. A embalagem com saco plástico fica localizada dentro da embalagem de caixa de madeira completando o *kit* de peças para montar a máquina quando chegar ao cliente final.

Portanto, os dados coletados em 2011 retratam a situação sem a balança de precisão e com o funcionário que causava muitos erros por distração. Em 2012 os dados retratam o ambiente ainda sem a instalação definitiva da balança, porém devido ao teste-piloto com a balança de precisão, neste período muitos erros de contagem foram detectados pelo novo processo eletrônico de pesagem. Por fim, a partir de Março de 2013 iniciou-se a instalação da solução do *poka-yoke* de balança de precisão digital, um período em que já foi possível apurar os resultados do projeto em análise.

Os dados são apresentados no quadro 4 são as quantidades de peças faltantes em cada embalagem enviada, a máquina ou produto embalado e a família das máquinas fabricadas.

Quadro 4 - Quantidade de peças faltantes nas embalagens enviadas aos clientes

Ano embalagem	Máquina ou Produto Embalado	Qtde reclamada	Família de máquinas	Ano embalagem	Máquina ou Produto Embalado	Qtde reclamada	Família de máquinas
2011	XRSG16DSC	1	15	2011	XRSG	1	15
2011	XRSG16DSC	1	15	2011	XRSG	8	15
2011	XRII4DSC	16	17	2011	XRSG	8	15
2011	XRII4DSC	8	17	2011	XRSG	1	15
2011	XRII4DSC	8	17	2011	XRSG14DSC	3	15
2011	XRII4DSC	8	17	2011	XRSG14DSC	8	15
2011	XRII4DSC	8	17	2011	XRSG14DSC	8	15
2011	XRII4DSC	9	17	2011	XRSG14DSC	8	15
2011	XRII4DSC	8	17	2011	XRSG14DSC	8	15
2011	XRII4DSC	8	17	2011	XRSG14DSC	8	15
2011	XRII4DSC	9	17	2011	XRSG14DSC	8	15
2011	XRII4DSC	1	17	2011	XRSG16DSC	3	15
2011	XRII4DSC	1	17	2011	XRSG16DSC	3	15
2011	XRSG16DSC	2	15	2011	XRSG16DSC	1	15
2011	XRSG16DSC	12	15	2011	XRSG16DSC	1	15
2011	XRSG16DSC	12	15	2011	XRSG16DSC	2	15
2011	XRSG16DSC	12	15	2011	XRSG16DSC	2	15
2011	XRSG16DSC	1	15	2011	XRSG16DSC	2	15
2011	XRSG16DSC	4	15	2011	XRSG16DSC	2	15
2011	XRSG16DSC	4	15	2011	XRII6DSC	6	17
2011	XRSG16DSC	4	15	2011	XCRII6DSC	6	17
2011	XRSG16DSC	4	15	2011	XRII6DSC	12	17
2011	XRSG16DSC	4	15	2011	XRII6DSC	12	17
2011	XRSG16DSC	4	15	2011	XRII6DSC	12	17
2011	XRSG16DSC	4	15	2011	XRII6DSC	12	17
2011	XRSG16DSC	4	15	2011	XRII6DSC	12	17
2011	CRSG16DSC	1	15	2011	XRII6DSC	1	17
2011	XRSG16DSC	4	15	2011	XRII6DSC	1	17
2011	XRSG16DSC	4	15	2011	XRII6DSC	1	17
2011	XRSG16DSC	1	15	2011	XRII6DSC	1	17
2011	XRSG16DSC	5	15	2011	XRII6DSC	1	17
2011	XRSG16DSC	5	15	2011	XRSG14DSC	2	15
2011	XRSG14DSC	1	15	2012	XRSG14DSC	1	15
2011	XRSG14DSC	1	15	2012	XRSG14DSC	4	15
2011	XRSG14DSC	3	15	2012	XRII4DSC	3	17
2011	XRSG14DSC	3	15	2012	XRII4DSC	3	17
2011	XRSG14DSC	3	15	2012	XRII4DSC	3	17
2011	XRSG14DSC	3	15	2012	XRII4DSC	2	15
2011	XRSG14DSC	6	15	2012	XRSG14DSC	4	15
2011	XRSG14DSC	6	15	2012	XRSG14DSC	1	15
2011	XRSG14DSC	6	15	2012	XRSG14DSC	1	15
2011	XRSG14DSC	6	15	2012	XRSG14DSC	1	15
2011	XRSG14DSC	6	15	2012	XRII6DSC	4	17
2011	XRSG14DSC	6	15	2012	XRII6DSC	4	17
2011	XRII6DSC	16	17	2012	XRII6DSC	4	17
2011	XRII6DSC	2	17	2012	XRII6DSC	4	17
2011	XRII6DSC	2	17	2012	XRSG14DSC	1	15
2011	XRII6DSC	16	17	2012	XRSG14DSC	1	15
2011	XRII6DSC	16	17	2012	XRSG14DSC	1	17
2011	XRIIXTCR	1	17	2012	XRSG14DSC	1	17
2011	XRIIXTCR	1	17	2013	XRII6DSC	1	17
2011	XRIIXTCR	1	17	2013	XRII6DSC	1	17
2011	XRIIXTCR	1	17	2013	XRII6DSC	1	17
2011	XRSG	8	15	2013	XRII4DSC	1	17

Fonte: Elaboração Própria

5.1 Análise descritiva dos dados

Inicialmente considera-se uma análise descritiva dos dados do gráfico na figura 29.

Figura 29 - Diagrama de pizza para os números de peças faltantes em cada ano.



Fonte: Elaboração Própria

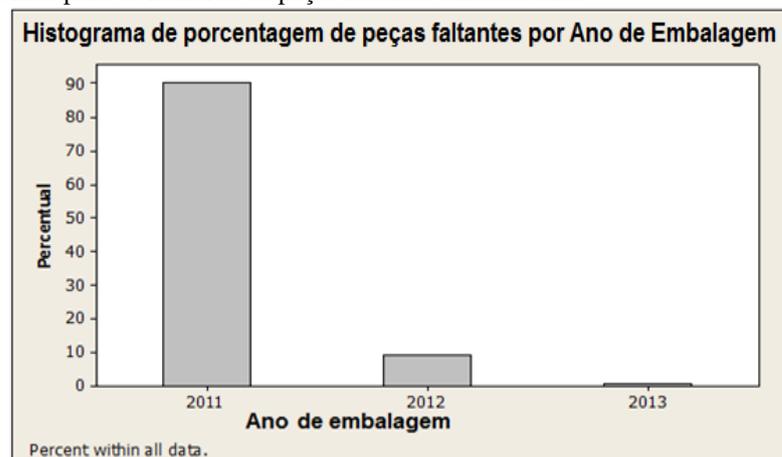
Figura 30 - Diagrama de pizza para os números de peças faltantes em cada família de produtos.



Fonte: Elaboração Própria

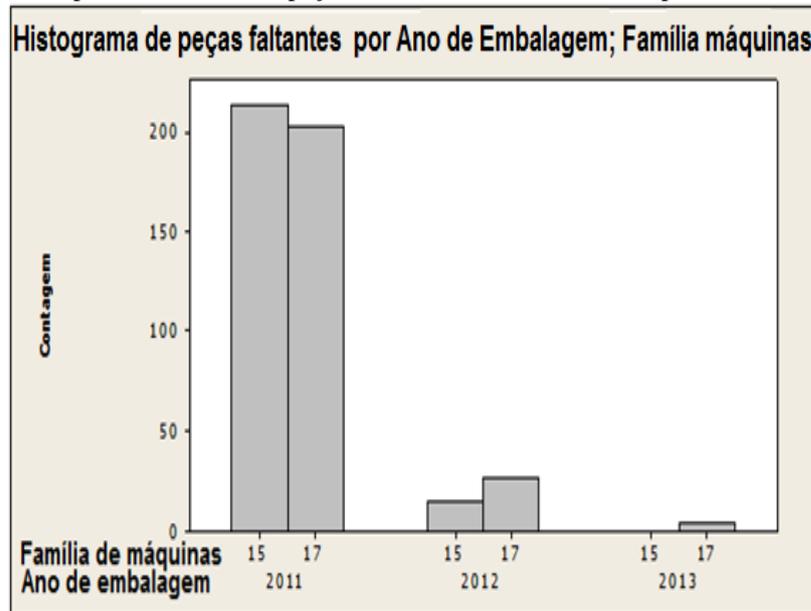
Pelos gráficos nas Figuras 29 e 30, observa-se que houve grande diminuição da quantidade de peças faltantes nos anos 2011, 2012 e 2013 (respectivamente dados por 416, 42 e 4) e que as quantidades de peças faltantes em cada família são aproximadamente iguais para as famílias 15 e 17 (dados respectivamente por 228 e 234). Isso também é observado nos histogramas apresentados nos gráficos das figuras 31 e 32.

Figura 31 - Histogramas para os números de peças faltantes em cada ano.



Fonte: Elaboração Própria

Figura 32 - Histogramas para os números de peças faltantes em cada família de produtos em cada ano.



Fonte: Elaboração Própria

Quadro 5 - Frequências observadas de peças faltantes nos anos de 2011,2012 e 2013.

	Categoria Observado	Proporção	Esperado	contr. qui-quadrado
2011	416	0,333333	154	445,740
2012	42	0,333333	154	81,455
2013	4	0,333333	154	146,104

Fonte: Elaboração Própria

Vale ressaltar que as quatro peças faltantes registradas em 2013 (ano de implementação desse *poka-yoke*) foram consideradas improcedentes.

Apesar de as frequências serem muito diferentes entre os anos, como observado no quadro 5, um teste de hipótese qui-quadrado foi aplicado para confirmar estatisticamente essas diferenças. É importante salientar que nesse caso o teste é apenas uma forma complementar para fortalecer a conclusão de diferenças de frequências.

A partir de um teste de hipótese qui-quadrado, nota-se claramente que as proporções observadas diferem das proporções esperadas com a hipótese de proporções iguais. O valor-p obtido usando o *software* MINITAB[®] é bem menor do que 0,001 (um nível de significância fixado bem pequeno). O resultado desse teste usando o *software* MINITAB[®] é apresentado no quadro 6, a seguir:

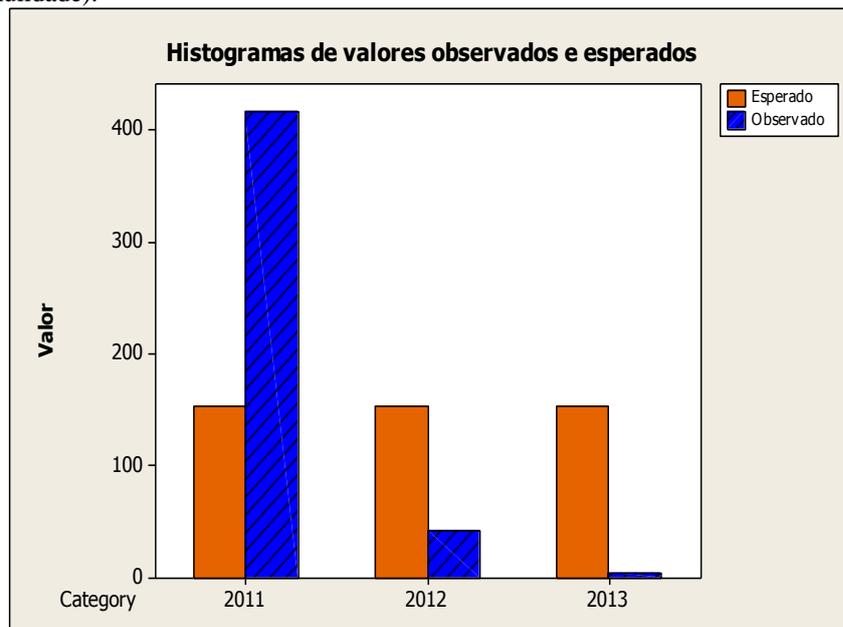
Quadro 6 - Teste qui-quadrado de ajuste para as contagens observadas por ano de embalagem

Categorias: ANOS DE EMBALAGEM				
Categoria	Observado	Proporção	Esperado	Qui-quadrado
2011	416	0,333333	154	445,740
2012	42	0,333333	154	81,455
2013	4	0,333333	154	146,104
N GL Qui-quadrado Valor-P				
462 2 673,299 0,000				

Fonte: Elaboração Própria

Conclui-se que a partir do teste qui-quadrado, deve ser rejeitada a igualdade de proporções (462/3) para os anos 2011, 2012, 2013 (valor-p < 0,05), isto é, estatisticamente a quantidade de peças faltantes diminui ano a ano, como já era esperado a partir dos resultados da análise descritiva. No gráfico da figura 33, destacam-se os histogramas das frequências observadas e esperadas sob a hipótese de nulidade para os anos de 2011, 2012 e 2013.

Figura 33 - Histogramas para os números de peças faltantes em cada ano (observado e esperado sob a hipótese de nulidade).



Fonte: Elaboração Própria

A partir dos histogramas do gráfico da figura 33, confirma-se visualmente a grande diferença das frequências entre os anos.

Da mesma forma, observa-se por um teste qui-quadrado que as proporções de peças faltantes para as duas famílias são estatisticamente iguais.

O resultado desse teste usando o *software* MINITAB[®] é apresentado no quadro 7.

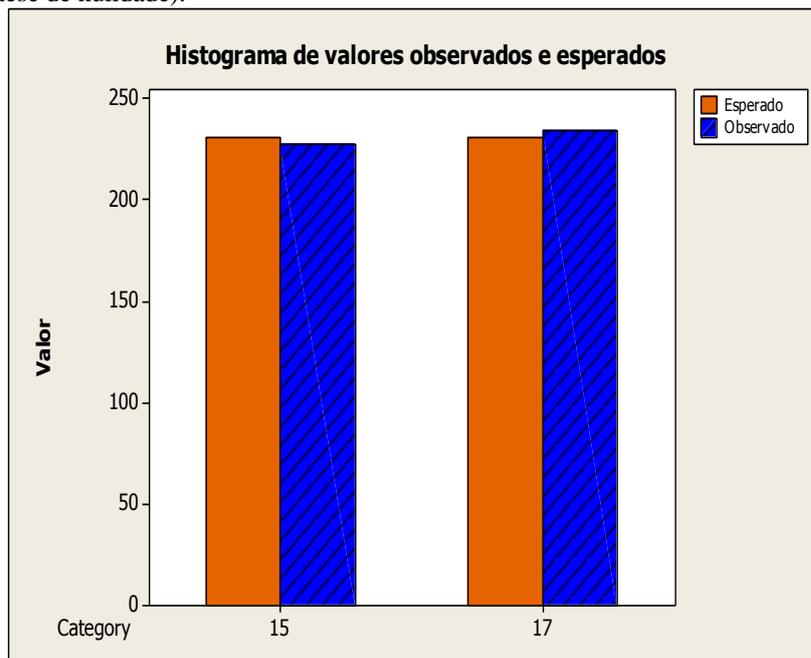
Quadro 7 - Teste qui-quadrado de ajuste para as contagens observadas para as famílias de máquinas

Categorias: FAMÍLIAS DE MÁQUINAS				
Categoria	Observado	Proporção	Esperado	qui-quadrado
15	228	0,5	231	0,0389610
17	234	0,5	231	0,0389610
N		GL	qui-quadrado	Valor-P
462		1	0,0779221	0,780

Fonte: Elaboração Própria

Conclui-se a não rejeição de igualdade de proporções para as famílias de máquinas (valor-p > 0,05), isto é, estatisticamente a quantidade de peças faltantes entre as duas famílias é razoavelmente aproximado. No gráfico da figura 34, destacam-se os histogramas das frequências observadas e esperadas sob a hipótese de nulidade para as famílias de produtos 15 e 17.

Figura 34 - Histogramas para os números de peças faltantes em cada família (observado e esperado sob a hipótese de nulidade).



Fonte: Elaboração Própria

No quadro 8, observa-se que os tipos de máquinas apresentavam médias de peças faltantes diferentes antes do uso do *poka-yoke*, talvez relacionadas à particularidade de cada máquina. Novamente observa-se que as médias de peças faltantes para cada família de máquinas são razoavelmente aproximadas como observado no gráfico 6.

Quadro 8 - Médias de peças faltantes para cada tipo de máquina e família de máquinas

Variável	Máquina	N	Média	D.Padrão	Mínimo	Máximo
Qtde	XRIXTCR	4	1,0000	0,000000	1,0000	1,0000
	XRI14DSC	15	6,33	4,08	1,00	16,00
	XRI16DSC	22	6,14	5,63	1,00	16,00
	XRSG	5	5,20	3,83	1,00	8,00
	XRSG14DSC	26	3,962	2,690	1,000	8,000
	XRSG16DSC	26	3,808	3,311	1,000	12,000
Variável	família	N	Média	D.Padrão	Mínimo	Máximo
Qtde	15	56	4,071	3,038	1,000	12,000
	17	42	5,571	5,008	1,000	16,000

Fonte: Elaboração Própria

5.2 Análise de variância (ANOVA)

Com base nos dados levantados, foi proposto um modelo de ANOVA com classificação para os logaritmos das contagens considerando os fatores das máquinas e suas famílias.

Vale ressaltar certo cuidado com essa análise exploratória usando modelos de ANOVA, principalmente quando há dados de contagem. Dessa forma, foi aplicada uma análise de variância com uma classificação considerando os dados de contagem transformados para uma escala logarítmica ($\log(\text{contagem})$) para terem-se as suposições necessárias para a ANOVA verificadas. Com essas transformações, essa análise pode ser útil na verificação das diferenças entre médias para cada nível e para cada fator (ver quadros 9 e 10).

✓ Máquinas - $\log(\text{quantidade})$

Quadro 9 - ANOVA $\log(\text{contagem peças faltantes})$ - fator máquinas.

FONTE	GL	SQ	QM	F	P
Máquina	5	9,074	1,815	2,27	0,054
Error	92	73,667	0,801		
Total	97	82,740			
S = 0,8948 R-Sq = 10,97% R-Sq(adj) = 6,13%					
NÍVEL	N	MÉDIA	DESVIO PADRÃO		
XRIXTCR	4	0,0000	0,0000		

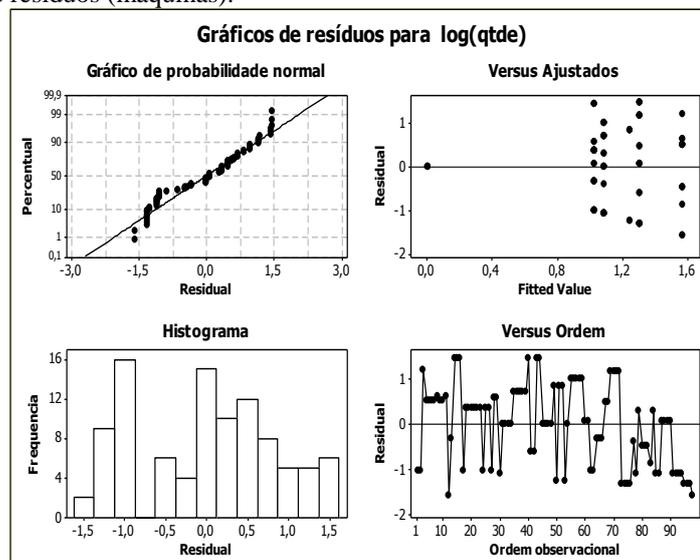
XRI14DSC	15	1,5755	0,8517
XRI16DSC	22	1,3078	1,0954
XRSG	5	1,2477	1,1390
XRSG14DSC	26	1,0890	0,8293
XRSG16DSC	26	1,0282	0,7982
IC 95% INDIVIDUAIS PARA AS MÉDIAS			
NÍVEL	-+-----+-----+-----+-----		
XRI14DSC	(-----*-----)		
XRI16DSC	(---*---)		
XRSG	(-----*-----)		
XRSG14DSC	(-----*-----)		
XRSG16DSC	(-----*-----)		
	-+-----+-----+-----+-----		
	-0,80	0,00	0,80
			1,60
DESVIO PADRÃO PONDERADO=0,8948			

Fonte: Elaboração Própria

Analisando os resultados do quadro 9, observa-se que as médias de contagens de peças faltantes na escala logarítmica não apresentaram diferenças significativas usando um modelo de ANOVA (valor-p > 0,05). Apesar disso, como o valor-p é bem próximo de 0,05, há alguma indicação de diferença de médias de contagem na escala logarítmica (ver intervalos de confiança 95% para as médias no quadro 8).

É importante salientar que o uso do modelo ANOVA deve satisfazer algumas suposições (normalidade e variância constante), mas essas podem ser colocadas em dúvida mesmo considerando os dados transformados para a escala logarítmica (ver gráficos de resíduos no gráfico da Figura 35).

Figura 35 - Gráficos de resíduos (máquinas).



Fonte: Elaboração Própria

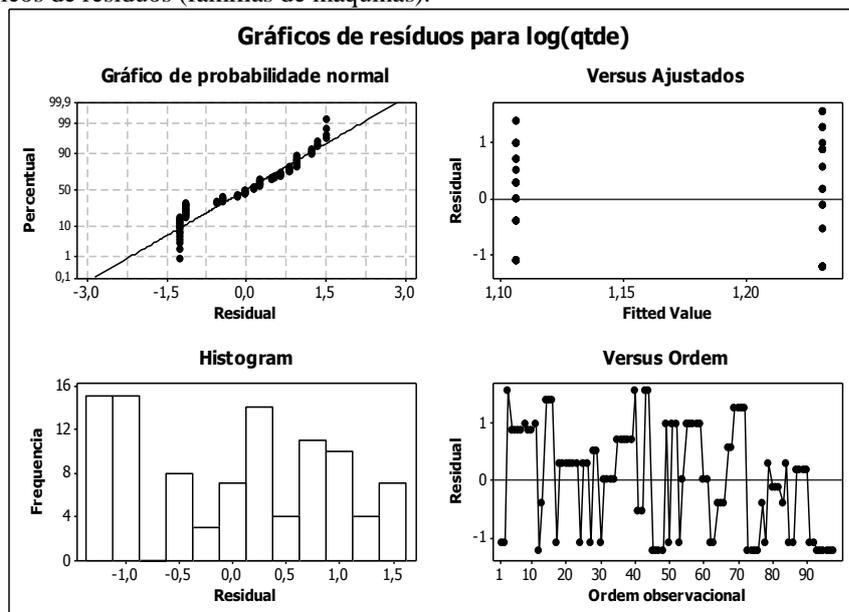
✓ **Famílias - log(quantidade)**

Quadro 10 - ANOVA log (contagem peças faltantes) - fator famílias de máquinas.

FONTE	GL	SQ	QM	F	P
família	1	0,372	0,372	0,43	0,512
Error	96	82,369	0,858		
Total	97	82,740			
S = 0,9263 R-Sq = 0,45% R-Sq(adj) = 0,00%					
IC 95% INDIVIDUAIS PARA AS MÉDIAS					
NÍVEL	N	MÉDIA	D. PADRÃO	-----+-----+-----+-----+--	
15	56	1,1068	0,8124	(-----*-----)	
17	42	1,2312	1,0600	(-----*-----)	
-----+-----+-----+-----+--					
1,00 1,20 1,40 1,60					
DESVIO PADRÃO PONDERADO = 0,9263					

Fonte: Elaboração Própria

Figura 36 - Gráficos de resíduos (famílias de máquinas).



Fonte: Elaboração Própria

Analisando os resultados do quadro 10, observa-se que as médias de contagens de peças faltantes na escala logarítmica não apresentam diferenças significativas usando um modelo de ANOVA (valor-p > 0,05).

Vale destacar que mesmo considerando os dados transformados para a escala logarítmica (ver gráficos de resíduos no gráfico da figura 36) os resíduos não satisfazem as suposições necessárias para validação das inferências obtidas.

5.3 Análise de regressão dos dados

O uso de modelos de regressão é fundamental para relacionar uma variável resposta conjuntamente a vários fatores que podem estar relacionados com essa resposta. Usualmente consideramos modelos de regressão linear, mas em algumas situações podemos ter modelos não lineares.

Na análise de regressão linear, os dados são modelados utilizando-se funções de previsão linear, e os parâmetros do modelo são desconhecidos e estimados a partir dos dados. Eles são chamados de modelos lineares (regressão linear). Mas, geralmente, refere-se a regressão linear para um modelo em que a média condicional de Y, dado o valor de X, é uma função de X. É importante salientar que a existência de uma dependência linear pode ser medida pelo coeficiente de correlação de Pearson. Nesse caso, os testes de hipóteses sobre o parâmetro de regressão indicam a existência ou não de uma correlação entre Y e a covariável X.

Para satisfazer algumas suposições necessárias do modelo de regressão (normalidade e variância constante dos erros) considera-se um modelo de regressão linear múltiplo com a resposta dada na escala logarítmica da mesma forma que foi considerado para o modelo de ANOVA.

Desta forma é utilizado o seguinte modelo de regressão na resposta $y_i = \log$ (quantidade peças faltantes) em que $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ e X_7 são definidos em (3); ε_i são erros aleatórios supostos como independentes, com uma distribuição normal com média zero, e variância constante σ^2 .

Assim, considera-se o seguinte modelo de regressão na resposta $y_i = \log$ (quantidade peças faltantes):

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \beta_3 x_{3i} + \beta_4 x_{4i} + \beta_5 x_{5i} + \beta_6 x_{6i} + \beta_7 x_{7i} + \varepsilon_i \quad (2)$$

Em que $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ e X_7 são definidos em (3); ε_i são erros aleatórios supostos como independentes, com distribuição normal com média zero, e variância constante σ^2 . Vale ressaltar que o modelo proposto (2) é empírico e pode descrever a relação existente entre a variável resposta y e as covariáveis x_1, x_2, \dots, x_7 . Na prática, é sempre importante verificar a adequação de um modelo aos dados, em geral a partir de uma análise dos resíduos e comparações entre os valores observados e os valores ajustados.

Estimadores de mínimos quadrados dos coeficientes de regressão do modelo (2) são obtidos usando o *software* MINITAB® versão 16.

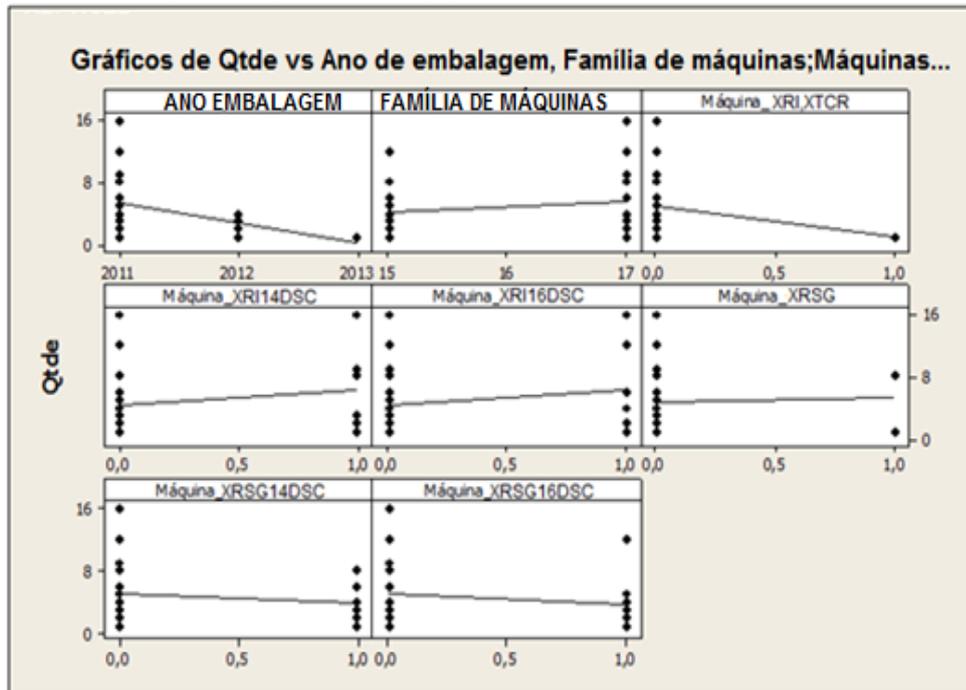
Para uma análise estatística levando em conta o efeito conjunto das covariáveis e para determinação de previsões, considera-se o uso de modelos de regressão linear. No gráfico da figura 37, temos gráficos da resposta contagem de peças faltantes *versus* algumas covariáveis:

- X_1 : Ano de embalagem: 2011, 2012 e 2013.
- X_2 : Famílias de máquinas: 15 ou 17.
- X_3 : Variável indicadora de Máquina XRIXTCR (igual a 1 para máquina XRIXTCR e igual a zero para outras máquinas).
- X_4 : Variável indicadora de Máquina.XRI14DSC (igual a 1 para máquina XRI14DSC e igual a zero para outras máquinas). (3)
- X_5 : Variável indicadora de Máquina.XRI16DSC (igual a 1 para máquina XRI16DSC e igual a zero para outras máquinas).
- X_6 : Variável indicadora de Máquina XRSG (igual a 1 para máquina XRSG e igual a zero para outras máquinas).
- X_7 : Variável indicadora de Máquina XRSG14DSC (igual a 1 para máquina XRSG14DSC e igual a zero para outras máquinas).

É importante observar que como vários fatores são variáveis qualitativas, define-se como variáveis *dummy* para esses fatores (DRAPER e SMITH, 1981). A máquina_XRSG16DSC foi considerada como referência entre as variáveis indicadoras.

O uso de variáveis *dummy* é frequente na análise de regressão na presença de covariáveis categóricas em lugar de covariáveis contínuas conforme observado em qualquer texto introdutório de estatística (ver, por exemplo, DRAPER e SMITH, 1981). Uma variável *dummy* é indicadora com valores iguais a um (uma categoria de interesse) ou zero para uma categoria de referência.

Figura 37 - Gráficos da resposta de quantidade de peças faltantes versus algumas covariáveis



Fonte: Elaboração Própria

Por meio das análises relatadas no gráfico da figura 37, observa-se que há algum efeito das covariáveis dadas pelas variáveis *dummy*, o que sugere que o uso de um modelo de regressão múltiplo para a análise dos dados pode ser importante para comprovar ou não os efeitos dessas covariáveis na resposta de interesse (log(contagem)).

Com o uso de um modelo de regressão linear múltiplo, é possível por meio de testes de significância para cada parâmetro de regressão observar se existe efeito significativo (teste de hipótese para parâmetro de regressão ser igual à zero) de cada covariável.

Assumindo o modelo de regressão (2) temos o seguinte modelo ajustado (equação ajustada), obtido usando o *software* MINITAB[®], versão 16:

$$\begin{aligned} \log(\text{qtde}) = & 1743 - 0,865 \text{ Ano (Embalagem)} - 0,123 \text{ família} - 0,782 \text{ Máquina_XRI_XTCR} \\ & + 1,12 \text{ Máquina_XRI14DSC} + 0,919 \text{ Máquina_XRI16DSC} \\ & + 0,219 \text{ Máquina_XRSG} + 0,379 \text{ Máquina_XRSG14DSC} \end{aligned} \quad (4)$$

No quadro 11, temos os sumários das inferências (estimadores de mínimos quadrados e valor-p para testar se os parâmetros de regressão são iguais a zero) obtidas para esse modelo.

Quadro 11 - Estimadores de mínimos quadrados, estatística T de Student e valor-p.

Parâmetro	Constante	Coef	SE Coef	T	P
de intercepto		1743,2	332,3	5,25	0,000
Ano (Embalagem)		-0,8654	0,1654	-5,23	0,000
família		-0,1229	0,2375	-0,52	0,606
Máquina_XRIXTCR		-0,7824	0,6366	-1,23	0,222
Máquina_XRI14DSC		1,1229	0,5111	2,20	0,031
Máquina_XRI16DSC		0,9188	0,5265	1,74	0,084
Máquina_XRSG		0,2194	0,3853	0,57	0,570
Máquina_XRSG14DSC		0,3793	0,2283	1,66	0,100

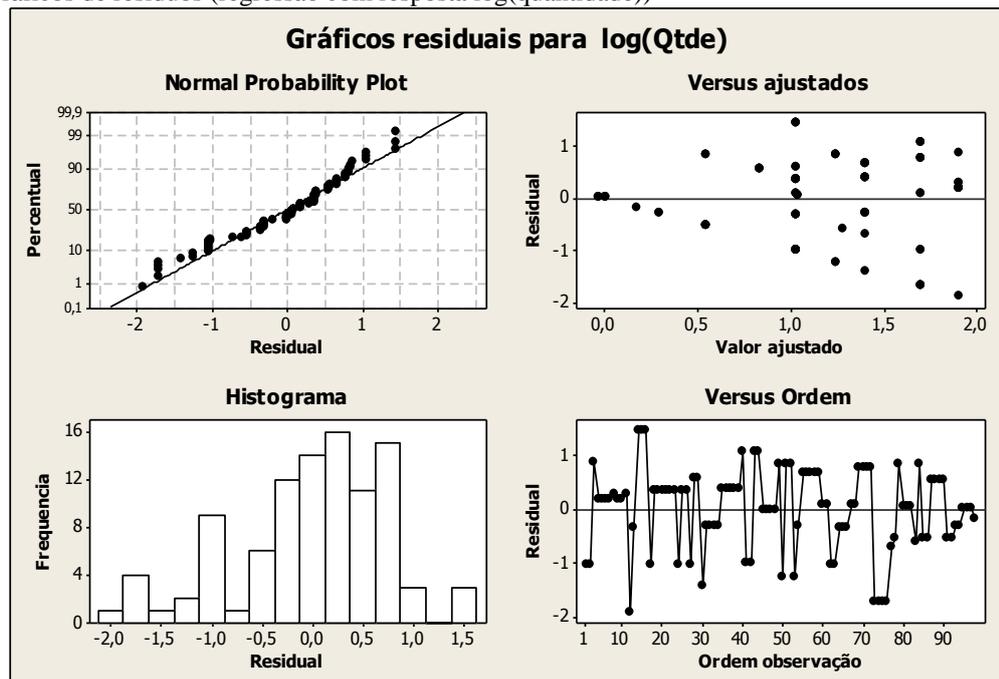
Fonte: Elaboração Própria

Por meio dos resultados do quadro 11, verificamos que as covariáveis significativas na quantidade de peças faltantes (valores-P menores do que 0,05) são as seguintes: ano de embalagem (coeficiente negativo que indica que há decréscimo de contagem de peças faltantes para cada ano) e Máquina-XRI14DSC (coeficiente positivo que indica que há aumento de contagem de peças faltantes para a máquina XRI14DSC, resultado que está de acordo com a análise exploratória inicial para os dados).

Considerando um nível de significância igual a 0,10, também teríamos a significância de outra covariável: Máquina-XRI16DSC (valor-p menor do que 0,10).

Analisando os gráficos dos resíduos dados relatados no gráfico da figura 38, nota-se que as suposições necessárias para a validade do modelo estatístico (normalidade dos resíduos, variância constante dos erros) são razoavelmente verificadas para o modelo assumindo a resposta pelo fator de quantidade de peças faltantes na escala logarítmica. Com as suposições verificadas, os resultados de inferência obtidos foram validados.

Figura 38 - Gráficos de resíduos (regressão com resposta log(quantidade))



Fonte: Elaboração Própria

5.4 Análise de regressão de *Poisson*

É importante salientar que o uso de várias técnicas estatísticas existentes pode enriquecer a análise dos dados, ou mesmo descobrir outros fatores significativos considerando melhores e mais sensíveis modelos estatísticos. Observar que foi usado um modelo de regressão linear com erros normais para os erros considerando, os dados de contagem transformados para uma escala logarítmica o que nem sempre é apropriado, pois as respostas são contagens discretas (dados não normais). Dessa forma, outra alternativa para analisar os dados seria o uso de métodos bayesianos, assumindo as respostas na escala original sem necessidade de transformação logarítmica para total de caixas e produção média. Para isso, consideramos modelos de regressão de *Poisson* sob um enfoque bayesiano. Uma breve introdução à metodologia bayesiana é mostrada no apêndice A deste trabalho.

Seja Y_i uma variável aleatória com uma distribuição de Poisson dada por,

$$P(Y_i = y_i) = \frac{e^{-\lambda_i} \lambda_i^{y_i}}{y_i!}, \quad (5)$$

em que $y_i = 0, 1, 2, \dots$ denota a quantidade de peças faltantes, $i = 1, 2, \dots, 98$. Observar que a média e a variância da distribuição de *Poisson* (5) são iguais a λ_i .

Para relacionar o parâmetro λ_i com as covariáveis $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ e X_7 que são definidos em (3), consideramos o seguinte modelo de regressão:

$$\log(\lambda_i) = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \beta_3 x_{3i} + \beta_4 x_{4i} + \beta_5 x_{5i} + \beta_6 x_{6i} + \beta_7 x_{7i} \quad (6)$$

A formulação (6) garante que λ_i seja positivo, para $i = 1, 2, \dots, n$.

Assumindo o modelo definido acima, a função de verossimilhança para o vetor θ de parâmetros associados a cada modelo é dada por:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^{98} f(\text{dados}/\theta) \quad (7)$$

Em que $\theta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7)$ e $f(\text{dados}/\theta)$ é a função de probabilidade de *Poisson* (5) para os dados.

Para a análise bayesiana, admitem-se as seguintes distribuições *a priori* para os parâmetros de regressão: $\beta_0 \sim N(0,10)$, $\beta_r \sim N(0,100)$, $r = 1,2,\dots,7$, em que $N(c,b^2)$ denota distribuição normal com média igual ao valor c e variância igual ao valor b^2 .

Combinando-se a distribuição *a priori* conjunta para θ (um produto de distribuições normais) com a função de verossimilhança $L(\theta)$, dada em (7), determina-se, por meio da fórmula de *Bayes*, a distribuição a posteriori para θ (BOX e TIAO, 1973).

Os sumários *a posteriori* de interesse foram obtidos usando métodos de Monte Carlo em Cadeias de Markov (GELFAND e SMITH, 1990; CHIB e GREENBERG, 1995). Uma grande simplificação na geração de amostras da distribuição *a posteriori* para θ foi obtida usando o *software OpenBugs* (SPIEGELHALTER et al., 2003), que só requer a especificação da distribuição para os dados e as distribuições *a priori* para os parâmetros.

Assumindo a regressão de *Poisson* definidas por (5) e (6), e usando o *software OpenBugs* com uma amostra simulada de aquecimento (*burn-in-sample*) de tamanho 1.000, descartada para eliminar o efeito dos valores iniciais usados no algoritmo *Gibbs Sampling*, e simulando outras 10.000 amostras escolhidas de 10 em 10 para se ter amostras aproximadamente não correlacionadas, foi obtida uma amostra final de tamanho 1.000 de valores gerados para β_0 e β_r , $r = 1,2,\dots,7$. Os sumários obtidos (média *a posteriori*, desvio-padrão *a posteriori* e intervalos de credibilidade com probabilidade igual a 0,95) são dados no quadro 11. A convergência do algoritmo foi monitorada usando métodos gráficos (GAMERMAN, 1997; PAULINO et al., 2003) e obtidas diretamente do *software OpenBugs*. Dos resultados do quadro 12, observa-se que as covariáveis X_1 (ano de embalagem); X_3 (Variável indicadora de Máquina_XR14DSC); X_4 (Variável indicadora de Máquina_XR16DSC) e X_5 (Variável indicadora de Máquina_XR116DSC) têm efeitos significativos no que se refere às peças faltantes, pois o valor zero não está incluído nos intervalos de credibilidade 95% dos parâmetros de regressão. É importante salientar que sob o enfoque bayesiano, em geral usam-se os intervalos de credibilidade para verificar a significância de um parâmetro em vez de usar

o valor-p de testes de hipóteses. Dessa forma um parâmetro é significativo se o valor zero não está incluído em seu intervalo de credibilidade e é não significativo se o valor zero está incluído em seu respectivo intervalo de credibilidade.

Dessa forma, observa-se que o modelo de regressão de *Poisson* sob o enfoque bayesiano é mais sensível para detectar as covariáveis importantes na variabilidade da quantidade de peças faltantes. É importante destacar que apesar de reconhecer a redução de peças faltantes ao longo dos anos, foi possível identificar as covariáveis de interesse que possuem correlação em relação à análise de regressão linear múltipla descrita na seção 5.3 deste trabalho.

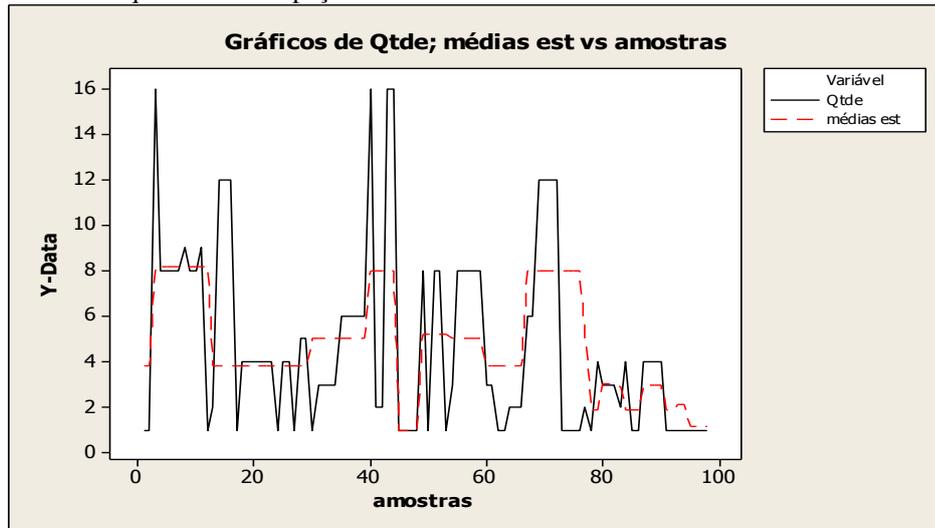
Quadro 12 - Sumários a posteriori e intervalos de credibilidade 95%.

VARIÁVEL	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	i.c. 95% Lim.Inf.	i.c. 95% Lim.Sup.
α_0 -Parâmetro constante de intercepto	1,652	2,141	-2,302	6,217
α_1 -Ano de embalagem	-0,9974	0,1432	-1,296	-0,7322
α_2 -Família de máquinas	0,04501	0,1432	-0,2618	0,3069
α_3 -MAQ_XRITCR	-1,568	0,6075	-2,84	-0,4266
α_4 -MAQ_XRI14DSC	0,6746	0,3161	0,1057	1,312
α_5 -MAQ_XRI16DSC	0,6538	0,3189	0,04277	1,308
α_6 -MAQ_XRSG	0,3046	0,2177	-0,1099	0,7341
α_7 -MAQ_XRSG14DSC	0,2822	0,1469	-0,00275	0,572

Fonte: Elaboração Própria

No gráfico da figura 39 temos os gráficos de quantidades de peças faltantes e médias estimadas *versus* amostras. Observa-se bom ajuste do modelo de regressão de *Poisson*.

Figura 39 - Gráficos de quantidades de peças faltantes e médias estimadas versus amostras.



Fonte: Elaboração Própria

5.5 Discussão dos resultados

A análise descritiva dos dados evidenciou a redução da quantidade de peças faltantes ano a ano, enquanto que as observações das proporções de peças faltantes para as duas famílias analisadas se mostraram estatisticamente similares. Vale destacar que essas duas famílias selecionadas não demonstraram diferenças significativas, muito provavelmente porque os erros ocorreram de forma involuntária. É relevante salientar que houve quatro unidades registradas no último ano de análise, no entanto foram consideradas improcedentes com a implantação do *poka-yoke*, por isso não foi zerado. Desta forma, considera-se fundamental destacar essas ocorrências pelo fato de que os clientes possuíam o hábito de reclamar de peças faltantes, mesmo sem ter razão, por falta de controle da contraprova dos kits de peças dentro das embalagens.

Usando um modelo de Análise de variância (ANOVA), observou-se claramente que as médias de contagens de peças faltantes na escala logarítmica não apresentaram diferenças significativas. Apesar disso, identificou-se diferença de médias de contagem na escala logarítmica nas covariáveis de interesse, o que já era esperado pela análise descritiva dos dados realizada no primeiro momento.

Com relação às análises de regressão linear múltipla e de *Poisson*, observa-se alta correlação e linearidade entre as covariáveis de interesse como o ano de embalagem que representou decréscimo de peças faltantes ao longo dos anos, e sobretudo com as máquinas XRI14DSC e XRI16DSC que se destacaram com significância entre os modelos de máquinas com alto índice de peças faltantes.

6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

6.1 Conclusões

Assumindo análise descritiva dos dados, foi possível detectar que os tipos de máquinas apresentaram médias diferentes de peças faltantes antes do uso do *poka-yoke*, muito provavelmente relacionado à particularidade de cada máquina e ainda pela aleatoriedade dos erros provenientes da falta de atenção dos embaladores.

Com respeito ao uso de um modelo de ANOVA, os resultados observados nos fatores máquinas e famílias de máquinas não apresentaram diferenças significativas entre as médias de contagens de peças faltantes, apesar de evidenciar alguma indicação de diferença de médias de contagem na escala logarítmica, o que pode ser explicado pelos erros aleatórios praticados por mera distração dos embaladores no exercício de suas funções.

Por meio de uma análise de um teste de hipótese qui-quadrado de peças faltantes a cada ano, foi demonstrado claramente que as proporções observadas diferenciaram das proporções esperadas com as hipóteses de proporções iguais para os três anos do estudo (2011, 2012 e 2013), concluindo a rejeição pela igualdade de proporções (observadas x esperadas), isto é, estatisticamente a quantidade de peças faltantes diminui ano a ano. Em contrapartida, em relação às famílias de máquinas, o mesmo teste apresentou que as proporções de peças faltantes para as duas famílias são estatisticamente iguais, não havendo, portanto, a rejeição de igualdade de proporções para as famílias de máquinas.

Para uma análise de um modelo de regressão linear, por meio dos resultados obtidos ficou patente que a covariável associada a ano de embalagem teve impacto significativo evidenciado pelo coeficiente negativo indicando decréscimo de contagem de peças faltantes para cada ano. Outras covariáveis com grande significância foram relatadas pelo coeficiente positivo indicando aumento de contagem de peças faltantes nas máquinas XRI14DSC e XRI16DSC, observando que a máquina XRS16DSC foi considerada referência entre as variáveis indicadoras, um resultado que está de acordo com a análise exploratória inicial dos dados, o que de fato são as máquinas mais representativas em vendas, caracterizadas como os carros-chefes da empresa.

No que tange ao modelo de regressão de *Poisson* sob o enfoque bayesiano, ele se mostrou bastante sensível para detectar as covariáveis importantes na variabilidade de peças faltantes, o que possibilitou indicar a variável ano embalagem e as variáveis das máquinas XRI14DSC e XRI16DSC com efeitos significativos na produção diária de caixas de embalagens.

Por fim, o estudo concluiu que o uso de modelagens estatísticas como a análise de um teste de hipótese qui-quadrado, o modelo de regressão linear e o modelo de *Poisson* mostraram linearidade e alta correlação para identificar as variáveis de significância para validar a eficiência do *poka-yoke* ajudado pela tecnologia de informação. Desse modo, a análise descritiva dos dados e de variância (ANOVA) apresentaram similaridade entre as observações dos resultados obtidos ao indicar que houve alguma diferença nas médias de contagem na escala logarítmica pela segunda análise, o que já era esperado pela investigação realizada na primeira análise.

Para validar o *poka-yoke* no curtíssimo prazo, esse estudo não utilizou a técnica de Calarge e Davanso (2004) para checar a totalidade de peças defeituosas, porém avaliou e fez aprimoramentos contínuos no dispositivo por meio de apuração de erros encontrados pelos próprios embaladores num período de 30 dias de testes gerais. No médio e longo prazos foram utilizadas as técnicas estatísticas amplamente relatadas nesse trabalho.

É importante enfatizar que este trabalho, pela sua originalidade e relevância, contribui com o aspecto inovador ao utilizar *poka-yoke* eletrônico de verificação de contagem de peças no processo de embalagem por meio de balança de precisão, um avanço fundamental para agregar valor ao conceito dessa técnica que evolui constantemente desde a sua origem, por Shigeo Shingo na Toyota nos anos 60, a despeito de não ser apenas um dispositivo de aspecto mecânico. Com respeito à rastreabilidade do pedido, ficou evidente que esta solução atendeu a este propósito com o registro de todas as pesagens no sistema de informação.

Esses resultados podem ser de grande interesse industrial e empresarial.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Os estudos desenvolvidos nessa dissertação permitiram identificar as seguintes oportunidades para futuras pesquisas:

- a) Aplicar a análise do modo e efeito de falha ou simplesmente FMEA, como uma alternativa para uma boa confiabilidade na avaliação de desempenho para a implantação de dispositivos *poka-yokes*.
- b) Verificar a possibilidade de introduzir o monitoramento das avaliações de desempenho de dispositivos *poka-yokes* por meio do ciclo PDCA, do inglês *Plan-Do-Check-Act*.
- c) Analisar qual o comportamento, com respeito às melhorias implementadas ao longo do tempo, de uma unidade fabril ou linha de produção ou estação de trabalho que

experimenta a avaliação de desempenho de seus dispositivos *poka-yokes* e comparar com outros(as) que não são passados pela avaliação respectiva.

Referências

- BAYERS, P.C. Using poka yoke (mistake proofing devices) to ensure quality. CONFERENCE PROCEEDINGS 1994. **IEEE**, Ninth Annual, Orlando, EUA, v.1, p.201–204, 1994.
- BASEER, K.K; REDDY, A.R.M.; BINDU,C.S. Quantitative Validation of Poka-Yoke approach for HQLS using Regression Coefficient and Analysis of Variance. 3rd Internacional Conference on Eco-Friendly Computing and Communication Systems. **IEEE**, p.255–260, 2014.
- BHATTACHARYYA, G.; JOHNSON, R.A. **Statistical Concepts and Methods**. John Wiley and Sons, International Edition, 1978.
- BOX, G.; TIAO, G. **Bayesian inference in statistical analysis**. New York: Addison - Wesley, 1973.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis and model building**. New York: John Wiley, 1978.
- BURLIKOWSKA, M. D.; SZEWIECZEK, D. The Poka-Yoke method as an improving quality tool of operations in the process. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v.36, p.95-102, 2009.
- BUSINESS WEEK, Can anything stop Toyota? **Business week**, 17 November, 2003.
- CALARGE, F.A.; DAVANSO, J. C. Conceito de dispositivos à prova de erros utilizados na meta do zero defeito em processos de manufatura. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v.11, n. 21, p.7-18, 2004.
- CHATFIELD, C. **Statistics for Tecnology**. Chapman and Hall, 2^a ed., 1980.
- CHERN-SHENG, L.; JUNG, K.; CHI-CHIN, L.; YUN-LONG, L.; HUNG-JUNG, S. Automatic inspection and strategy for surface defects in the PI coating process of TFT-LCD panels. **Assembly Automation**, v. 31, n.3, p. 244–250, 2011.
- CHIB, S.; GREENBERG, E. Understanding the metropolis-hastings algorithm. **The American Statistician**, v.49, p.327-335, 1995.
- CROSBY, Philip B. **Qualidade é investimento**. Tradução Áurea Weisenberg. Rio de Janeiro, José Olympio, 1994.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis, Wiley series in probability and mathematical statistics**, 1981.
- FIALHO, R. C. N.; TORRES JUNIOR, N.; SILVA, C. M. V. A. O uso de poka-yoke no processo de prescrição médica de uma clínica especializada na prevenção e no tratamento de doenças neoplásicas. **XXXI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 2011.
- FISHER, M. Process improvement by poka-yoke. **MCB University Press, Work Study**, v. 48, n.7, p. 264–266, 1999.

- GHADGE K.R.; MONE P.P. PLC Based POKE-YOKE System for Output Shaft Assembly. **Applied Mechanics and Materials**, vols.110-116, p. 5384-5389, 2012.
- GAMERMAN, D. **MARKOV CHAIN MONTE CARLO**: stochastic simulation for Bayesian inference. 1ª ed., Chapman and Hall, 1997.
- GELFAND, A. E.; SMITH, A.F.M. Sampling-based approaches to calculating marginal distributions. **Journal of the American Statistical Association**, v.85, n.410, p.398- 409, 1990.
- GROUT, J. Mistake-proofing the design of the health care processes. **AHRQ – Agency for Healthcare Research and Quality**, n.7, 155 p., 2007.
- HARTLEY, J.F. **Case studies in organizational research**. In: CASSEL, C. e SYMON, G. Qualitative methods in organizational research: a practical guide. Sage Publications, 1995.
- HINCKLEY, C.M. **Make no mistake**: An outcome-based approach to mistake-proofing. Portland, Oregon: Productivity Press, 2001.
- IBRAHIM, J. G.; CHEN, M.H.; SINHA, D. **Bayesian survival analysis**. New York: Springer Verlag, 2001.
- IMAN. **Poka-yoke: Métodos à prova de falhas**. São Paulo: Instituto IMAN, 1998.
- KOSTINA, M.; KARAULOVA, T.; SAHNO, J.; MALEKI, M. Reliability estimation for manufacturing processes. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v.51. p. 7-13, 2012.
- LIKER, J. K.; MEIER, D. **O modelo Toyota**: manual de aplicação: um guia prático para a implementação dos 4Ps da Toyota. Porto Alegre: Bookman, 2007.
- MANIVANNAN, S. Error proofing enhances quality. **Manufacturing Engineering**, v.137, n.5, p. 99-104, 2006.
- MANIVANNAN, S. Improve productivity with poka-yoke. **Assembly Magazine**, p. 34-39, 2007.
- McCULLAGH, P.; NELDER, J. A. **Generalized linear models**. Chapman and Hall, 2 ed., 1989.
- MIDDLETON, P. Lean Software Developing: two case studies. **Software Quality Journal**, v.9, n.4, p. 241-252, 2001.
- MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Applied statistics and probability for engineers**. Fifty edition, New York: Wiley, 2001.
- MOURA, A.R.; BANZATO, J.M. **Poka-yoke: A eliminação dos defeitos com o método à prova de falhas**. São Paulo: Iman, 1996.
- NOGUEIRA, L.J.M.; RIBEIRO, R.; DIONÍSIO, A. **Melhoria da qualidade através de sistemas poka-yoke**. 2010. 44f. Dissertação de Mestrado da Faculdade de engenharia da Universidade do Porto, 2010.

- PATIL, P.S.; PARIT, S.P.; BURALI, Y.N. Review Paper On Poka Yoke: The evolutionary Idea. In: Total Productive Management, Research Inventy. **International Journal of Engineering and Science**, v.2, n.4, p.19-24, 2013.
- PAULINO, C.D; TURKMAN, M.; MURTEIRA, B. **Estatística bayesiana**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2003.
- PLONKA, F. E. Developing a Lean and Agile Work Force. **Journal of Human Factors and Ergonomics in Manufacturing**, v.7, n.1, p.11-27, 1997.
- RIBEIRO, A. J. F. **Um estudo sobre mortalidade dos aposentados por invalidez do regime geral da previdência social (RGPS)**. 2006. 191 f. Tese de Doutorado em Demografia - Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional, Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- SAURIN, T.A.; RIBEIRO J.L.D.; VIDOR, G. A framework for assessing poka-yoke devices. **Journal Of Manufacturing Systems**, v.31, p.358-366, Elsevier, 2012.
- SCHMIDT, C. M. C. **Modelo de regressão de Poisson aplicado à área da saúde**. 2003. 98 f. Dissertação de Mestrado em Modelagem Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2003.
- SHAHIN, A.; GHASEMAGHAEI, M. Service Poka Yoke. **International Journal of Marketing Studies**, vol. 2, n. 2, p.190-201, 2010.
- SHIMBUN, N. K. **Poka-yoke: Improving quality by preventing defects**. Portland, Oregon: Productivity Press, 282 p. , 1988.
- SHINGO, S. **Zero quality control: Source inspection and the poka-yoke system**. Massachusetts: Productivity Press, 1986.
- SHINGO, S. **O sistema Toyota de produção: Do ponto de vista da engenharia de produção**. 1. ed. , Porto Alegre: Bookman, 1996.
- SISSONEN, J.P. **Poka-yoke for mass customization**. 2008. 103f. Tese de Doutorado (PhD) Faculty of Technology Management, Hensinki, 2008.
- SPIEGELHALTER, D. J.; THOMAS, A.; BEST, N.G.; LUNN, D. **WinBugs: user manual**, version 1.4, MRC Biostatistics Unit, Cambridge, UK, 2003.
- THIOLLENT, M. **Pesquisa-ação nas organizações**. São Paulo: Atlas, 1997.
- WOOD JUNIOR, T.; URDAN, F. T. Gerenciamento da qualidade total: Uma revisão crítica. **Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, v. 34, n. 6, p. 46-59, 1994.
- YIN, R.K. **Estudo de caso: Planejamento e métodos**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

Apêndice A: Algumas considerações sobre a análise bayesiana

Em estatística, inferência bayesiana é um método em que a fórmula de *Bayes* é usada para atualizar a estimativa de probabilidade para uma hipótese. A atualização bayesiana é especialmente importante na análise dinâmica de uma sequência de dados.

Ela determina a probabilidade *a posteriori* como consequência de dois antecedentes, uma probabilidade anterior, ou probabilidade *a priori*; e uma função de verossimilhança derivada de um modelo de probabilidade para os dados observados. A inferência bayesiana estima a probabilidade *a posteriori* para parâmetro de acordo com a fórmula de *Bayes* (BOX e TIAO,1973).

Seja $\mathbf{X} = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ um vetor aleatório definido no espaço de probabilidade (Ω, A, P_θ) em que Ω é o espaço amostral, A é uma sigma álgebra e P_θ é uma probabilidade. Sob a perspectiva bayesiana, a incerteza sobre o parâmetro desconhecido θ é descrito em forma de uma distribuição de probabilidade (BOX e TIAO,1973).

Dessa maneira, associa-se uma distribuição de probabilidade para θ , usualmente chamada de distribuição *a priori*. Posteriormente, pela análise dos dados, associamos uma distribuição de θ condicional à amostra, também chamada de distribuição *a posteriori*.

Em geral, o valor verdadeiro de θ é desconhecido, e o objetivo é fazer inferências sobre esse parâmetro. Para representar os diferentes graus de incerteza sobre um parâmetro θ , diferentes modelos probabilísticos são elicitados; desta forma, cada pesquisador pode formular um modelo estatístico baseado no seu grau de conhecimento sobre o parâmetro específico. A informação sobre um parâmetro θ é representada probabilisticamente por $\Pi(\theta)$, também chamada de distribuição *a priori*, e incorporada ao estudo por meio do uso do teorema de *Bayes*, que combina a informação prévia do pesquisador com a informação contida nos dados, resultando na distribuição *a posteriori*.

Segundo interpretação de Ibrahim et al. (2001), a análise Bayesiana é baseada em especificar um modelo probabilístico para o vetor de dados observados \mathbf{T} , dado um vetor de parâmetros θ , levando em consideração uma função de verossimilhança $L(\theta | \mathbf{T})$.

Assumindo, então, que θ é aleatório, conseqüentemente tem-se uma distribuição *a priori* denotada por $\Pi(\theta)$. A inferência sobre θ é baseada numa distribuição *a posteriori*, a qual é obtida pelo teorema de Bayes. A distribuição *a posteriori* de θ é dada por:

$$\pi(\theta | \mathbf{T}) = \frac{L(\theta | \mathbf{T})\pi(\theta)}{\int_{\theta} L(\theta | \mathbf{T})\pi(\theta)d\theta} \quad (8)$$

Na obtenção de sumários *a posteriori*, por exemplo, a média *a posteriori* de θ , precisamos resolver integrais múltiplas muitas vezes, complicadas, o que exige o uso de métodos numéricos ou de aproximações de integrais, especialmente quando a dimensão do vetor de parâmetros é grande.

Disso surge a necessidade do uso de métodos computacionais de simulação introduzidos na literatura, como o método de Monte Carlo em Cadeias de Markov (MCMC), em especial os algoritmos de Metropolis-Hastings, e o amostrador de Gibbs (Gibbs Sampler) (GELFAND e SMITH, 1990; CHIB e GREENBERG, 1995).

Quando as distribuições condicionais *a posteriori* para cada parâmetro têm formas de distribuições conhecidas e são simples para gerar amostras, é mais usual utilizar-se do amostrador de Gibbs, que é baseado em um processo MCMC, o qual gera amostras das distribuições condicionais completas, que convergem para a distribuição *a posteriori* de interesse; caso contrário, o algoritmo de Metropolis-Hastings é utilizado, no caso em que as distribuições condicionais *a posteriori* não possuem formas de distribuições conhecidas e simples para geração de amostras.