

A Melhoria da Qualidade Suportada na Metodologia Seis Sigma: o Caso da Tecnimaster

Carlos Eduardo Veríssimo Carvalho

Dezembro de 2008

Universidade Fernando Pessoa - Porto

A Melhoria da Qualidade Suportada na Metodologia Seis Sigma: o Caso da Tecnimaster

Carlos Eduardo Veríssimo Carvalho

Dezembro de 2008

Universidade Fernando Pessoa - Porto

A Melhoria da Qualidade Suportada na Metodologia Seis Sigma: o Caso da Tecnimaster

Orientador: Doutor João Gomes

Parecer:

Dissertação apresentada à Universidade Fernando Pessoa
como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre
em Gestão da Qualidade

Resumo

O Seis Sigma foi criado pela Motorola, nos anos oitenta do século passado, em consequência do aumento da competição global. A partir daí, tornou-se numa estratégia de gestão adoptada pela generalidade das organizações com negócios à escala mundial. As empresas de desempenho médio têm níveis de três ou quatro sigmas e, as companhias de desempenho excelente, seis sigmas. Isto significa que, os seus produtos e processos têm apenas 3,4 defeitos por milhão de oportunidades.

Um programa Seis Sigma bem gerido traz grandes benefícios às organizações que o adoptam, permitindo menores custos de produção, ganhos de produtividade, diminuição de defeitos e tempos de ciclo mais curtos. Contudo, o Seis Sigma ganhou reputação de se adequar apenas a grandes empresas. Acredita-se que, no entanto, é possível implementar um projecto Seis Sigma numa organização de poucos recursos, tendo-se efectuado um estudo na **Tecnimaster**, empresa que corresponde a esta caracterização.

Foi desenvolvido um projecto de pequena dimensão na **Tecnimaster**, relativo à montagem de um circuito impresso que utiliza a técnica de montagem de superfície (SMD) e, foi escolhida uma amostra, destinada a estudar os defeitos das soldaduras e a sua distribuição. Seguiu-se o ciclo de melhoria DMAIC do Seis Sigma e, foram escutadas as expectativas dos clientes, de forma a integrá-las no processo. Calculou-se a capacidade geral do processo de montagem dos circuitos impressos e, utilizando algumas técnicas estatísticas e ferramentas da qualidade, determinou-se a causa principal para o aparecimento de defeitos nas soldaduras: a deposição da pasta de solda. Tentou-se de seguida a sua melhoria, através da utilização da Concepção de Experiências (DOE), para determinação das principais variáveis responsáveis pelo surgimento dos defeitos. Finalmente, deveria ter sido efectuada a optimização desses factores. Esta fase não foi concluída por falta de condições de tempo e recursos.

Os resultados encontrados são concordantes com os obtidos pela generalidade dos autores consultados e, confirmam que, o processo da deposição da pasta de solda é a causa principal dos defeitos nas soldaduras. Como conclusão, pode-se afirmar que é possível conduzir um projecto Seis Sigma numa pequena organização desde que a gestão assuma esse compromisso e haja técnicos dotados das necessárias competências.

Résumé

Motorola a créé le mouvement du Six Sigma dans les années quatre vingt du Siècle dernier, due à l'augment de la compétition globale. Dès ce jour là, le Six Sigma a devenu une stratégie de gestion adoptée généralement par des compagnies qui ont des affaires à l'échelle mondiale. Les compagnies dont l'accomplissement est moyen ont des niveaux de trois ou quatre sigma, et les compagnies excellentes, atteignent Six Sigma. Ça signifie, que ses produits et procédés ont seulement 3,4 défauts par million d'opportunités.

Un programme Six Sigma bien managé apporte beaucoup de bénéfices aux compagnies qui l'adoptent, moindres coûts de production, gains de productivité, moins d'erreurs et temps de cycle réduits. Pourtant, le Six Sigma a gagné une réputation d'être seulement approprié pour les entreprises de grande taille. On ne partage pas cet avis, et avons essayé de mettre en œuvre un projet Six Sigma dans **Tecnimaster** une entreprise de faible recours.

On a développé un petit projet à **Tecnimaster** concernant le montage d'un circuit à montage de surface (SMD) et, on a choisi un échantillon, pour étudier les défauts des soudures et sa distribution statistique. On a suivi le cycle DMAIC du Six Sigma et les attentes des clients ont été auscultées de façon à les intégrer dans le procédé d'amélioration.

La capacité générale du procédé de montage de circuits imprimés a été calculée et, avec le recours à des techniques statistiques et outils de la qualité, on a déterminé la cause principale pour les défauts des soudures – le processus de déposition de la pâte à souder. On a essayé de faire son amélioration avec la Conception d'Expériences (DOE) pour trouver les facteurs responsables par les défauts des soudures. Il fallait, en suite, faire l'optimisation de ces variables. On n'a pas pu le faire à cause du manque de conditions de temps et de recours. Malgré cela, les résultats obtenus sont d'accord avec ceux des auteurs qu'on a consultés et ratifient le procédé de déposition de la pâte à souder comme le principal responsable par les défauts des soudures. À guise de conclusion, il est possible mener à bout un projet Six Sigma avec succès. Il suffit que la gestion le veuille et d'en avoir des techniciens avec la compétence requise.

Abstract

Motorola created the Six Sigma movement, in the 1980s, as a means to cope with increasing global competition. Since then, the Six Sigma approach has become a widely used management strategy for companies that intend to compete in a world-wide scale. Average companies work at three to four sigma levels, and best in class companies at six sigma level. This means that their products and processes experience only 3,4 defects per million of opportunities.

A well managed Six Sigma program endorses many benefits for the companies who adopt it, like cost savings, productivity gains, error reduction and improved cycle times, among others. Nevertheless, Six Sigma has earned a reputation of being tailored for big companies only. However, a Six Sigma project was tried at **Tecnimaster** to implement it in a company with scarce resources.

In that endeavour a small project was addressed at **Tecnimaster**, regarding circuit board SMD assembling and a sample of manufactured circuits handled, in order to find solder defects and its statistical distribution. The Six Sigma DMAIC cycle was followed, and, as a first step in the improvement process, the client's expectations were sounded.

The main process capability of the printed circuit assembling was determined and with the aid of several statistical techniques and quality tools the most important cause for the solder defects occurrence was found – the solder paste deposition process. His improving was attempted through Design of Experiments in order to find the main factors responsible for solder defects. This phase of the project was not pursued due to the lack of appropriate conditions. Results found are in accordance with those obtained by the authors consulted, and confirm that the solder paste deposition process is the main factor for the increasing number of solder defects.

As a conclusion, it can be said that it is possible to run a Six Sigma project in a small company with success if the management wishes to do so, and if there are a minimum of human resources with the necessary technical abilities.

Dedicatória

Ao Professor Doutor João Gomes, meu orientador, o meu agradecimento pelo indispensável apoio e manifesta disponibilidade demonstrada ao longo da elaboração desta dissertação.

À gerência da **Tecnimaster** que me concedeu as facilidades necessárias à execução deste trabalho, com especial referência ao Sr. Alberto Luís Ferreira e ao Eng. José Alberto Fernandes da Silva.

Ao Eng. Vitor Marques, agora quadro da **VISTEON**, que me providenciou o apoio técnico e os esclarecimentos que necessitei para a cabal compreensão dos processos de fabrico em causa.

A todo o pessoal da **Tecnimaster** que comigo colaborou e que forneceu preciosa ajuda.

Índice

I.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	O Problema	1
1.2.	Objectivo.....	2
1.3.	Metodologia	2
1.4.	Estrutura da Dissertação.....	3
II.	REVISÃO DA LITERATURA: SEIS SIGMA E CIRCUITOS IMPRESSOS	5
2.1.	O que é o Seis Sigma?.....	5
2.2.	A Necessidade do Seis Sigma	7
2.3.	Caracterização do Seis Sigma	9
2.4.	O Desvio da Média até 1,5 Sigma.....	12
2.5.	Cálculo do Sigma de um Processo	15
2.5.1.	Primeiro Método: dados discretos.....	16
2.5.2.	Segundo Método: dados do tipo contínuo.....	16
2.6.	Cálculo do Rendimento da Produção (<i>Yield</i>).....	21
2.8.	O Ciclo DMAIC.....	24
2.9.	Ferramentas para o Seis Sigma	32
2.9.1.	O Mapa de Processos	32
2.9.2.	O QFD.....	35
2.9.3.	As Cartas de Controlo	38
2.9.3.1.	Cartas de Controlo para Variáveis	41
2.9.3.2.	Cartas de Controlo para Atributos.....	43
2.9.4.	O Diagrama de Causa e Efeito	46
2.9.5.	A Concepção de Experiências.....	47
2.9.5.1.	Conceitos e Metodologia.....	49
2.9.5.2.	Experiências Elementares	50
2.9.5.3.	Experiências de Tipo Factorial.....	51

2.9.5.3.1. Análise Estatística	59
2.10. O Seis Sigma nas Pequenas Empresas	61
2.10.1. Alguns Mitos acerca do Seis Sigma	61
2.11. O Processo de Montagem dos Circuitos Impressos	64
2.11.1. Questões Derivadas dos Condicionamentos Legais	65
2.11.2. Fundamentos da Soldadura dos Circuitos Electrónicos	66
2.11.3. Técnicas de Soldadura.....	68
2.11.4. Defeitos	75
2.12. Critérios de Qualidade de Aceitação dos Produtos	77
III. METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO.....	79
3.1. Introdução	79
3.2. Objectivos da Investigação	79
3.3. Tipo de Pesquisa	80
3.4. O Estudo de Caso	80
3.4.1. Fases de um Estudo de Caso	83
3.4.2. Tipos de Estudos de Caso	84
3.4.3. Protocolo do Estudo de Caso	84
3.5. Classificação dos Dados.....	85
3.5.1. Dados primários	85
3.5.2. Dados Secundários	86
3.6. Desenvolvimento e Objectivos da Metodologia Seis Sigma	86
3.7. O Projecto de Melhoria.....	87
IV. RESULTADOS E SUA DISCUSSÃO	94
4.1. Análise dos Processos da Empresa em Estudo.....	94
4.1.1. Técnicas de Soldadura.....	94
4.1.2. Mapa de Processos	101
4.2. O QFD de Melhoria	106
4.3. Cálculo da Capacidade do Processo.....	108
4.4. A Melhoria do Processo	114

4.5. Discussão dos Resultados	118
V. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
5.1. Objectivos e Limitações do Trabalho	119
5.2. Conclusões	121
5.3. Recomendações para Estudos Futuros	124
Bibliografia	125
Anexos	130

Índice de Figuras

Figura 2. 1	11
Figura 2. 2	13
Figura 2. 3	17
Figura 2. 4 – O Processo	28
Figura 2. 5 – O Ciclo DMAIC	31
Figura 2. 6 – QFD.	36
Figura 2. 7 – Carta de Controlo da Média.....	42
Figura 2. 8 – Experiência Factorial com 2 Factores.....	55
Figura 2. 9 – <i>Stencil</i> e <i>Squeegee</i>	69
Figura 2. 10 – Forno de <i>Reflow</i>	70
Figura 2. 11 – Perfil Térmico de Refluxo	71
Figura 2. 12 – Soldadura por Onda.	74
Figura 2. 13 – Deposição da Pasta de Solda	77
Figura 3. 1 – Diagrama do Projecto de Melhoria.....	90
Figura 4. 1 – Máquina de Inserção SMD	96
Figura 4. 2 – Fluxograma de Montagem de CI	101
Figura 4. 3 – Processo de Produção da Tecnimaster	104
Figura 4. 4 – Processo de Produção (Continuação)	105
Figura 4. 5 – QFD de Melhoria.....	107
Figura 4. 6 – Capacidade do Processo Principal de Montagem dos CI.....	108
Figura 4. 7 – Gráfico de Pareto dos Defeitos nos CI.....	111
Figura 4. 8 – Diagrama de Causa e Efeito	112
Figura 4. 9 – Capacidade do Subprocesso do <i>Silk Screen</i>	113

I. INTRODUÇÃO

1.1. O Problema

No mundo moderno a mudança é constante e, a competição, cada vez mais intensa. Os desafios competitivos actuais derivam, principalmente, da exigência dos consumidores no aumento constante da qualidade dos produtos e serviços. Por isso é que, tópicos como a qualidade e a sua gestão, conjugadas com a melhoria contínua das actividades de negócio, são consideradas, pela generalidade das organizações, como meios de sobrevivência e de manutenção da vantagem competitiva sobre a concorrência.

O conceito da gestão da qualidade é antigo, mas a abordagem sistemática da qualidade está associada aos trabalhos de Walter A. Shewhart, na década de 1930 do Século passado, nos Bell Labs (Shewhart, 1986). Este autor fez uma contribuição significativa para a melhoria da qualidade e desenvolveu as cartas de controlo, que se baseiam no cálculo da probabilidade e na teoria estatística.

A filosofia de melhoria de qualidade de Shewhart representou uma mudança significativa no *Scientific Management* de Taylor (Taylor F. W., 1998). Controlar e reduzir a variação no processo de fabrico reduz os produtos defeituosos e as correcções. As cartas de controlo identificam e quantificam as variações existentes nos processos e produtos e, ao reunir dados temporais, monitorizam o processo constantemente. Definem dois tipos de variação: a provocada pela variação natural do sistema e pelas chamadas causas especiais. As causas naturais são inerentes ao processo de fabrico.

No final da década de oitenta do Século XX, surgiu uma filosofia de qualidade designada como *Total Quality Management* (TQM). Muitos gestores verificaram que a delegação de poderes, o trabalho de grupo e o controlo dos processos, conduziam à melhoria contínua e ao abaixamento de custos. As empresas que adoptaram o TQM submeteram-se a grandes mudanças; a qualidade tornou-se um factor a ter em conta.

Contudo, a comunidade empresarial começou a desencantar-se com a Gestão pela Qualidade Total (TQM). As expectativas iniciais acerca dos resultados financeiros das empresas não se materializaram, pelo menos, com a amplitude desejada. A solução

apareceu sob a forma do Seis Sigma que, não sendo uma rejeição do TQM, é um seu melhoramento, introduzindo uma metodologia para atingir resultados duma forma mais sistemática.

1.2. Objectivo

O Seis Sigma é uma abordagem à qualidade que utiliza um conjunto de conceitos e técnicas de gestão e estatísticas, que têm como objectivo, a redução da variação dos processos e a prevenção dos defeitos nos produtos. A variação de um processo é designada por sigma (σ), desvio padrão das medidas realizadas à volta da média. Num processo com o nível de seis sigmas, a variação é pequena comparada com os limites de especificação, i.e., há seis desvios padrão entre a média do processo e qualquer dos limites de especificação. Mesmo que a média do processo se desloque de $1,5 \sigma$ não há mais de 3,4 unidades por milhão fora dos limites de especificação.

O problema tratado no trabalho que segue, diz respeito ao processo de montagem e soldadura de componentes em circuitos impressos numa empresa da indústria electrónica - **Tecnimaster**. O processo apresentava um número de defeitos que precisava ser diminuído e numerosas soldaduras necessitavam de ser retocadas manualmente. Feito o diagnóstico das causas (fases *Measure* e *Analyze*) através da distribuição por tipo de defeito (análise de Pareto) e das causas subjacentes que lhes deram origem (diagrama de causa e efeito) foi calculada a capacidade do processo e, tentada a sua melhoria, através de técnicas estatísticas.

1.3. Metodologia

O Seis Sigma para a melhoria dos processos, usa um roteiro (DMAIC) de 5 fases:

1. *Define* – identificação dos potenciais projectos; selecção e definição dum projecto de melhoria.
2. *Measure* – documentação do projecto e medida da sua capacidade.

3. *Analyze* – recolha e análise de dados para determinar quais as variáveis críticas do processo.
4. *Improve* – realização de experiências para determinação das variáveis mais importantes e optimização do resultado do processo.
5. *Control* – medida da nova capacidade do processo e controlo dos ganhos.

O Seis Sigma é considerado uma metodologia eficaz, mas de aplicação restrita, porque exige grandes recursos humanos e financeiros, só ao alcance das grandes organizações. Pretende-se, no entanto, demonstrar que, é possível conduzir um projecto de melhoria de qualidade, baseado na filosofia Seis Sigma, através do recurso ao método do Estudo de Caso, numa organização de modestos recursos.

Verificou-se que, o processo de deposição da Pasta de Solda era o principal contribuinte para os defeitos existentes nas soldaduras. Na fase *Improve* realizou-se uma experiência exploratória de DOE¹ para determinar quais os factores mais importantes no processo de deposição da Pasta de Solda. Por falta de tempo e, em razão das restrições que nos foram impostas pela gestão da empresa em estudo, não foi possível proceder à optimização das variáveis mais importantes, nem realizar o controlo das melhorias entretanto conseguidas (fases *Improve e Control*).

1.4. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é constituída por cinco capítulos. O Capítulo I faz a introdução ao problema em estudo bem como procede à apresentação dos principais objectivos e hipóteses que são propostos.

O Capítulo II trata da revisão da literatura, introduz as técnicas de montagem e soldadura dos circuitos impressos e, procura descrever a filosofia e método do Seis Sigma, bem como algumas ferramentas utilizadas na melhoria da qualidade. Procurou-se, também, fornecer algumas definições para o Seis Sigma baseadas na opinião de alguns autores conceituados. Nas ferramentas, técnicas e métodos apresentados teve-se

¹ *Design of Experiments*

a preocupação de seguir uma sequência lógica e, tanto quanto possível, adequada ao trabalho desenvolvido. O ciclo DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*), que é o roteiro mais aplicado na metodologia Seis Sigma para a melhoria de processos, é descrito e analisado; e, as técnicas e ferramentas que normalmente lhe estão associadas, são apresentadas e discutidas. A adequação do Seis Sigma às pequenas empresas é também equacionada e analisada.

No Capítulo III, é apresentada a metodologia de investigação que sustenta esta dissertação e, discutido mais particularmente, o estudo de caso, como método de pesquisa: as suas características, fases, tipos e adequação à presente investigação. São apresentados os métodos e as fontes de recolha de dados. É feita, também, a discussão do DMAIC como metodologia e a sua integração ao presente trabalho, bem como a introdução do projecto de melhoria.

O Capítulo IV apresenta os resultados e descobertas do estudo levado a efeito, bem como as limitações encontradas. Os métodos, amostras e técnicas estatísticas utilizadas são analisados e discutidos.

O Capítulo V sumariza as descobertas, limitações e conclusões do estudo e, recomenda, áreas de potencial desenvolvimento para futuras investigações.

II. REVISÃO DA LITERATURA: SEIS SIGMA E CIRCUITOS IMPRESSOS

2.1. O que é o Seis Sigma?

Na última década do Século XX surgiu uma nova filosofia da qualidade conhecida por Seis Sigma que foi adoptada por grandes empresas à escala mundial, e.g., Motorola, General Electric, Ford, Honda, Sony, Hitachi, Texas Instruments, American Express, Samsung, etc. (Williams, 2001). A empresa Motorola foi a precursora da metodologia Seis Sigma. Bill Smith, Vice-Presidente e Director de Qualidade desta empresa de telecomunicações é universalmente considerado o fundador do Seis Sigma (Shina, 2002). No início de 1987, Bob Galvin, o Presidente Executivo da Motorola, comprometeu a organização com a execução de um plano cujo objectivo era aumentar o nível de qualidade de uma ordem de grandeza (dez vezes).

À época, ninguém na empresa sabia como atingir o objectivo, mas, na sua procura para melhorar a qualidade comprometeram-se com o objectivo de atingirem uma taxa de defeitos de 3,4 partes por milhão de oportunidades em cada fase dos seus processos. Muitas outras empresas adoptaram este alto nível de qualidade, bem como de redução de custos, capacidade de resposta, flexibilidade, e rotação de *stocks*. Uma das mais conhecidas, foi a General Electric (Shina, 2002). Alguns autores sugeriram que a filosofia Seis Sigma para a melhoria da qualidade não está a produzir apenas efeitos no sector estrito dos negócios, mas também está a reformular a disciplina da estatística (Hahn et al., 1999, *cit. in* Williams, 2001).

A letra Sigma (σ) é uma letra do alfabeto Grego que se tornou o símbolo estatístico e a métrica para a variação dos processos. A escala de medida sigma está perfeitamente correlacionada com características, tais como, o número de defeitos por unidade, partes por milhão de defeituosos e com a probabilidade de falha. O algarismo seis é o número de sigmas medidos no processo quando a variação em torno do valor alvo, é tal que, somente 3,4 de saídas do processo, num milhão de possibilidades, são considerados defeitos. Isto, partindo do princípio, que a média do processo se pode deslocar, no longo prazo, de 1,5 desvios padrão (Park, 2003).

O Seis Sigma pode ser definido de várias formas. (Pande, Neuman, & Cavanagh, 2002), afirmam que, o Seis Sigma pretende obter um objectivo estatístico de 3,4 defeitos por milhão de oportunidades (DPMO²) e, definem o Seis Sigma, como uma referência a um objectivo particular para reduzir os defeitos a quase zero. O sigma, ou desvio padrão, dá-nos a medida da quantidade de variação que existe num grupo de artigos de uma população para médias semelhantes. Quanto maior for a variação, maior será o desvio padrão. Em termos estatísticos, portanto, o propósito do Seis Sigma, é reduzir a variação para atingir desvios reduzidos, de tal forma que, quase todos os produtos ou serviços satisfaçam ou excedam as expectativas dos clientes e consumidores. De acordo com Pyzdek (2003), as empresas aceitaram tradicionalmente que os seus níveis de desempenho se situem entre os três a quatro sigmas, o que corresponde a 6200 e 67000 DPMO, respectivamente.

Para Pande et al. (2002), o estabelecimento de um objectivo claro é a componente central do Seis Sigma. As melhorias quantitativas no Seis Sigma incluem estabelecer valores alvo para os defeitos existentes num milhão de oportunidades (DPMO) e para o nível Sigma do processo. Embora Deming (2000), fosse de opinião contrária ao estabelecimento de objectivos numéricos e se suportasse no método, a gestão da qualidade tem proposto o uso de ferramentas da qualidade para a resolução de problemas (Breyfogle, 2003; Ishikawa, 2002). A utilização conjunta de ferramentas da qualidade e, métodos adequados, reduzem a complexidade da tarefa de obtenção de melhorias ao guiarem a pesquisa da descoberta de soluções para problemas complicados. O Seis Sigma advoga a aplicação rigorosa de ferramentas da qualidade em cada passo da metodologia de resolução de problemas (Linderman, 2006). No Seis Sigma, é sugerida a utilização prescritiva de ferramentas para ser utilizada em cada passo da metodologia do processo de melhoria (Strong, 2004).

Já para Pyzdek (2003), o Seis Sigma é uma forma de ajudar as organizações a aumentarem as receitas ao aumentar o valor para o consumidor e a eficiência. Este autor, considera que, seria um erro pensar que o Seis Sigma trata da qualidade no sentido convencional. A Qualidade, na definição convencional da conformidade com os requisitos internos, tem pouco a ver com o Seis Sigma. Nesse sentido, será necessário arranjar uma nova definição para a qualidade que integre os objectivos do Seis Sigma.

² Defeitos por Milhão de Oportunidades.

Para Pyzdek (2003), a qualidade deve ser definida, no contexto Seis Sigma, como o valor acrescentado gerado por uma estratégia e ambientes produtivos.

Pyzdek (2003), afirma ainda que, o Seis Sigma está focado na melhoria da qualidade ao ajudar as empresas a produzir produtos melhores e mais baratos, mais rapidamente. Refere que, há uma ligação clara entre o nível sigma a que empresa opera e o custo da má qualidade. Este autor é peremptório ao afirmar que, uma empresa que trabalhe no nível de três ou quatro sigmas, despende cerca de 25 a 40 por cento da sua receita anual na resolução dos problemas de má qualidade. Contudo, uma companhia operando no nível Seis Sigma gasta apenas cerca de cinco por cento da sua receita.

2.2. A Necessidade do Seis Sigma

Durante as últimas décadas, os progressos na indústria de alta tecnologia e da indústria electrónica têm sido fenomenais e continuam em aceleração. Os rácios de preço/desempenho continuam a seguir a tendência da indústria de obter maiores índices de desempenho, a menor custo. Gordon Moore, da Intel, propôs uma lei que tem o seu nome, e que prevê que, a complexidade dos circuitos integrados duplicará a cada nova geração, geralmente, em cada dezoito meses (Shina, 2002). Esta lei tem permanecido válida durante três décadas, e, tudo indica que assim continuará, por mais algumas gerações de circuitos integrados. A capacidade dos actuais discos duros dos computadores tem duplicado a cada dezoito meses e, o preço por Megabit, tem descido significativamente (Shina, 2002).

Tem havido, por outro lado, uma grande expansão no campo das comunicações, tanto em velocidade como na disponibilidade do serviço Internet. Estima-se que, o número de pessoas que acedem à Internet seja actualmente de 1400 milhões e, a utilização deste meio, cresceu 305% desde o início da década (Internet World Stats, 2008). No âmbito da qualidade foram desenvolvidas melhorias similares e, estes progressos, conduziram a um aumento significativo das expectativas dos consumidores relativamente à qualidade dos produtos e serviços que lhes são fornecidos.

As empresas corresponderam a este aumento de exigência através de processos de medida do seu desempenho interno e externo em diversas áreas das suas competências. Uma das técnicas empregues, designada por *benchmarking*, é um dos instrumentos favoritos dos gestores para estabelecer objectivos para as suas organizações que sejam comparáveis com o desempenho das empresas concorrentes. Podem ainda, medir o progresso das empresas no estabelecimento dos objectivos que se propuseram, em termos de qualidade, custos, capacidade de resposta e rotação de *stocks* (Shina, 2002).

É reconhecido que, é necessário encontrar um método preciso para desenvolver e melhorar os sistemas de qualidade, quer na concepção e fabrico, quer na melhoria da satisfação dos consumidores, que conduza a bons resultados, e que permita às empresas competir com produtos concebidos, produzidos e vendidos à escala global. O Seis Sigma é uma excelente metodologia para se fabricarem produtos com nível de classe mundial, bem como, para melhorar a produção de produtos e serviços, especialmente, em contextos de crescente complexidade.

Simultaneamente, os requisitos para se desenvolverem novos produtos nas indústrias de alta tecnologia acompanharam estes aumentos de complexidade e qualidade, necessitando que o desenvolvimento de novos produtos seja feito com maior rapidez de processos e ciclos de vida mais curtos. Muitas das empresas de grande dimensão criaram empresas subsidiárias dedicadas à concepção e desenvolvimento de serviços especializados, que podem ser executados de maneira mais eficiente do que se estivessem integradas na estrutura das organizações principais. Estas associações permitem que as organizações se concentrem no seu negócio nuclear, nas suas marcas, nos seus clientes, e nas suas competências principais de concepção e desenvolvimento. As novas companhias de *outsourcing*³ fornecem serviços com eficiência de custos e no tempo próprio. No campo do fabrico electrónico podemos referir como casos paradigmáticos os serviços de teste e ensaios, o desenvolvimento e fabrico de circuitos impressos, o fabrico de caixas metálicas, a injeção de plástico e o desenvolvimento de *software* de apoio (Shina, 2002).

As empresas de suporte oferecem menores custos, maior flexibilidade, excelente qualidade, eliminando a necessidade de despender capital em equipamento. O modelo de *outsourcing* permite que todos os elos da cadeia de fornecimento (*Supply Chain*) se

³ Entrega de actividades a terceiros por empresas cujo negócio principal não consiste nas referidas.

concentrem nas suas competências essenciais, reduzindo simultaneamente, os tempos de ciclo (Shina, 2002). O conceito de cadeia de fornecimento teve a sua origem na cadeia de valor (*Value Chain*). A cadeia de valor inclui a logística interna e externa e os processos nucleares. Outras funções como os recursos humanos, sistemas de informação e compras suportam os processos nucleares. As operações, a logística e o marketing são os principais participantes da cadeia de fornecimento. Nos anos mais recentes, a cadeia de fornecimento adquiriu um estatuto de primeira importância. Isto tem a ver com a oportunidade de reduzir custos, em simultâneo com o aumento de qualidade e melhoria de serviço (Foster, 2007).

2.3. Caracterização do Seis Sigma

Uma das definições do Seis Sigma diz que esta metodologia é uma meta para as características das unidades produzidas por um sistema de engenharia em processo de melhoria (Shina, 2002). Ou, segundo Schroeder (2008), o Seis Sigma é uma meso-estrutura⁴ organizada para reduzir a variação nos processos organizacionais utilizando especialistas de melhoria, um método estruturado e métricas de desempenho, com o propósito de atingir objectivos estratégicos. O Seis Sigma enfatiza o uso de métricas quantitativas para a melhoria contínua, tais como a medida sigma dos processos, as métricas das actividades, processos críticos para a qualidade, medidas dos defeitos, medidas de melhoria 10x, bem como as medidas da qualidade tradicional (Breyfogle, 2003; Pyzdek, 2003; Xingxing, 2008).

Como foi sugerido por Linderman (2005), a utilização de objectivos explícitos e desafiantes nos projectos Seis Sigma pode aumentar a ordem de grandeza das melhorias, reduzir a variabilidade do desempenho e melhorar o empenho dos colaboradores. Mais ainda, o Seis Sigma integra o desempenho a nível do negócio, as medidas dos processos e as métricas dos projectos num processo de revisão sistemática, de tal forma que, a gestão da organização é feita de forma quantitativa, havendo transferência da estratégia do negócio para tarefas tácticas (Xingxing, 2008).

⁴ A designação meso diz respeito à integração da análise micro e macro da estrutura.

No Seis Sigma, a métrica mais comum é o número de Defeitos por Milhão de Oportunidades (DPMO). Este conceito pode incluir desde um componente a parte de um material, linha de código, impresso administrativo, intervalo de tempo ou distância. Uma peça, ou produto, são classificados como defeituosos se o valor da medida desejada, designada por X, estiver fora dos limites de especificação, superior ou inferior (USL, LSL). Além dos limites de especificação, é referido um valor alvo, que é tipicamente, o valor médio entre o limite inferior e superior da especificação. O nível de qualidade sigma dá-nos um indicador da frequência da ocorrência de defeitos. Um alto nível de qualidade sigma indica um processo em que a ocorrência de defeitos é menos provável. Em consequência, à medida que o nível de qualidade sigma aumenta, também aumenta a fiabilidade dos produtos, diminuindo os custos correspondentes. É óbvio que, como consequência, a satisfação dos consumidores aumenta.

O nível Seis Sigma é uma condição especial da fórmula geral para calcular a capacidade dos processos. Esta, define a capacidade dum processo para gerar um produto sem defeitos. É uma relação entre as especificações dos produtos e a variação da produção, medida em termos de C_p ou C_{pk} , expressa como um índice numérico. A definição da capacidade de um processo, ou C_p , é dada por:

$$C_p = \frac{\text{Amplitude da especificação(ou tolerância do projecto)}}{\text{Capacidade do Processo(ou variação total do processo)}} \quad (1.1)$$

Mais especificamente,

$$C_p = \frac{USL-LSL}{6\sigma(\text{Amplitude total do processo de } -3\sigma \text{ a } +3\sigma)} \quad (1.2)$$

Esta fórmula pode ser expressa conceptualmente como,

$$C_p = \frac{\text{Especificações do produto}}{\text{Variação na produção do produto}} \quad (1.3)$$

A equação para C_{pk} , é:

$$C_{pk} = \min \left[\frac{USL - \bar{X}}{3\sigma}, \frac{\bar{X} - LSL}{3\sigma} \right] \quad (1.4)$$

Atinge-se o nível Seis Sigma quando as especificações do produto ou serviço se encontram a $\pm 6\sigma$ do valor alvo do processo de fabrico, o que corresponde a $C_p = 2$ ou $C_{pk} = 1,5$.

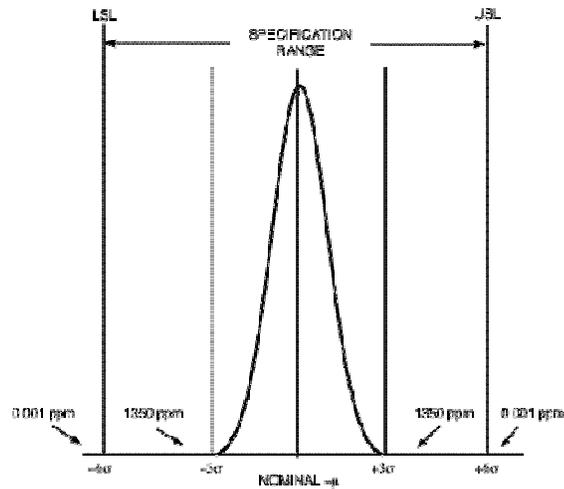


Figura 2. 1

Normalmente, os projectistas definem as especificações do produto, enquanto a engenharia de produção é responsável pela variação da produção. O objectivo de aumentar a capacidade do processo para níveis Seis Sigma pode ser atingido de duas formas: ou se aumentam as especificações do produto através do seu alargamento, ou se reduz a variação do processo de fabrico. Qualquer destes esforços pode ter um efeito positivo na obtenção de níveis de qualidade Seis Sigma (Shina, 2002). Mas, atenção, as especificações têm que fazer sentido. A forma mais simples de aumentar os índices de capacidade dum processo é alargar as especificações (Messina, 1999). O Seis Sigma é, pois, uma metodologia quantitativa, que implica disciplina, e envolve o estabelecimento de um sistema para a melhoria das métricas dos processos produtivos, de serviços ou financeiros (Brady, 2005).

De acordo com a metodologia Seis Sigma, um processo de fabrico com uma saída normalmente distribuída e um desvio padrão σ , tem de ter uma distância de seis desvios

padrão entre o valor alvo do processo e o limite de tolerância mais próximo, o que corresponde, como já foi dito, a uma capacidade do processo $C_p = 2$ (ver fig. 2.1, p. 11).

2.4. O Desvio da Média até 1,5 Sigma

Numa distribuição normal, a amplitude entre -3σ e $+3\sigma$, inclui 99,73% dos dados. Até o Seis Sigma se tornar popular, todos os cálculos de qualidade se baseavam nesta distribuição, sem qualquer ajuste (Pyzdek, 2008). Mas, o Seis Sigma altera este padrão, ao ajustar a média calculada de 1,5 sigma. A Motorola introduziu esta correção ao verificar que a média dos processos tendia, no longo prazo, a derivar em média de 1,5 desvios-padrão. Assumindo que esta variação de 1,5 sigma ocorreria, a Motorola ajustou a taxa esperada de defeitos para um nível correspondente a 7,5 sigma de um lado da média e 4,5 sigma do outro, relativamente aos limites de especificação, em vez dos 6 sigmas que ocorreriam se a média do processo estivesse alinhada com o valor alvo da especificação de fabrico (ver fig. 2.2, p. 13).

Todos os modelos são aproximações da realidade. O modelo baseado na distribuição normal, embora útil, não fornece resposta para certos tipos de problemas. A questão, é a de saber se admitindo uma correção de 1,5 sigma para a média, teremos uma resposta mais correcta. Num processo produtivo, as simplificações excessivas incluem estimar o desvio padrão na variação de curto prazo, executar medidas num produto que nunca foi utilizado, não tomar em consideração os efeitos da expedição e embalagem dos produtos e, a incapacidade de verificar, em que diferentes ambientes irão operar os produtos. A falta de conhecimento completo dos requisitos dos consumidores também contribui para uma má avaliação.

O desvio da média de 1,5 sigma é apenas uma correção que tenta levar em linha de conta factores que não estavam inicialmente consideradas no modelo inicial. É um facto bem conhecido que as métricas que se costumam utilizar em cálculos de qualidade subavaliam os problemas percebidos pelos consumidores. A regra do desvio de 1,5 sigma é uma regra simples que permite que os produtos ou serviços fornecidos aos

consumidores estejam mais de acordo com a realidade. Como todos os modelos, este é uma aproximação da realidade e sujeito a crítica (Pyzdek, 2008).

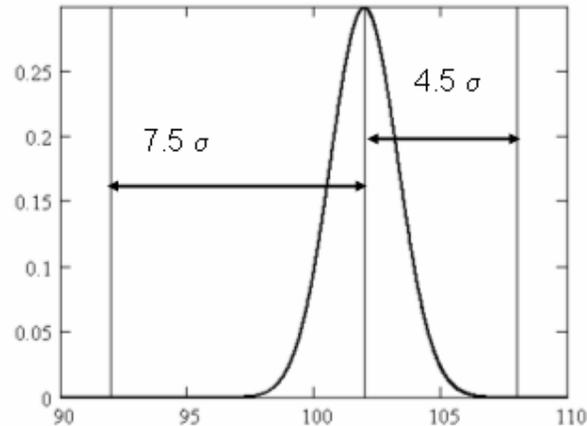


Figura 2. 2

Ao aceitar este desvio de 1,5 sigma como um dado adquirido, a Motorola pensou num valor alvo que ficaria razoavelmente perto da eliminação total de defeitos após a ocorrência do referido desvio. Um nível de 4,5 sigma (i.e., os limites de especificação estão a 4,5 desvios padrão da média do processo), conduziriam a um resultado esperado de 3,4 ppm⁵ de defeitos em cada ramo da curva normal, o que foi considerado pela Motorola como razoavelmente perto dos zero defeitos. O nível de 4,5 sigma após o desvio de 1,5 sigma, implicava que o processo precisava de ser projectado, de tal forma que, as suas especificações, ficariam a 6 sigma da média alvo. Daí o nome de Seis Sigma para o programa de melhoria de qualidade que esta empresa se propôs realizar (de Treville, 2004).

A capacidade de um processo tem sido definida historicamente como a média com mais ou menos três desvios padrão (sigmas). Submetidas ao Seis Sigma, as empresas têm-se tornado mais humildes acerca das suas capacidades de processo, tomando em consideração, explicitamente, que os três sigmas cobrem somente 99,73% da área sob a curva da distribuição normal. Daí que, os limites de especificação definidos pelo consumidor, a três sigma da média do processo, implicam um nível de defeitos de 2700 partes por milhão (de Treville, 2004).

⁵ Partes por milhão.

Um dos conceitos do Seis Sigma utilizado para colocar para a média um desvio de $1,5\sigma$ em perspectiva, é definir os defeitos ou erros baseados nas “oportunidades”, em vez das unidades; daí o desempenho ser especificado em termos de milhões de oportunidades (Defeitos por Milhão de Oportunidades, ou DPMO), em que se considera que uma oportunidade para defeito é uma falha do processo que é crítica para o consumidor (de Treville, 2004).

A suposição inicial da Motorola que a média do processo derivará em $1,5\sigma$ devido ao desgaste das ferramentas, mudança de equipamento ou operador, implica que, o processo pode não se encontrar em equilíbrio estatístico. Na lógica do Seis Sigma, a variação da média do processo é compensada por uma redução radical do nível sigma, de tal forma que, mais sigmas podem estar incluídos nas especificações definidas pelos consumidores. Em muitos processos a distribuição e a centralidade necessitam de acções de controlo diferentes. A variabilidade é normalmente provocada por uma combinação de muitas fontes de variação, muitas das quais podem ser identificadas por causas assinaláveis que podem ser eliminadas. A manutenção da centralidade, contudo, depende, muitas vezes, da regulação precisa do equipamento e da verificação regular dos parâmetros do processo. Uma das tendências dos operadores é deixar o processo entregue a si próprio desde que todos os indicadores principais se encontrem dentro do permitido.

Um dos pontos principais do Controlo Estatístico do Processo – SPC –, consiste em utilizar os dados provenientes do processo para determinar quando é necessária qualquer intervenção correctiva. Em condições que, essencialmente, não permitam a ocorrência de defeitos pode-se colocar a questão de utilizar cartas de controlo, ou inspecções regulares, para verificar se o processo se encontra centrado, em vez de utilizar a variação na média de $1,5\sigma$. Mas é, com certeza, mais caro, reduzir a variação num processo que não se encontra em equilíbrio estatístico, do que, assumir que o processo em equilíbrio estatístico é que varia.

A variação de $1,5\sigma$ altera todas as considerações acerca do SPC – *Statistical Process Control*. A Motorola, por exemplo, afirma que, um nível de qualidade de 5 sigma resulta em 1000 DPMO (de Treville, 2004). Um processo em que a média se encontre centrada, e os limites de especificação estejam afastados de cinco desvios padrão da

média, resulta num excelente desempenho: 99,999943% da área sob a curva normal, que representa cerca de 0,6 DPMO.

A escolha da métrica correcta para avaliar a qualidade de um processo é crucial para implementar melhorias no mesmo. As métricas mais comuns são a conclusão de tarefas, a contagem de erros e os índices de satisfação. Para tornar estas métricas com maior significado para as partes interessadas e, para fornecer uma interpretação mais fácil do desempenho do processo, é necessário estabelecer três passos:

- Identificar um limite de especificação, ou ponto de aceitação para cada medida, baseado nas atitudes ou comportamentos dos consumidores.
- As condições que não atinjam os objectivos estabelecidos pelos consumidores, serão definidas como “defeitos”.
- Cada medida será convertida numa forma normalizada que permita que as partes interessadas e, os analistas, saibam em que medida é que a métrica utilizada se encontra dentro do valor alvo estabelecido pelos consumidores.

O número de sigmas descreve a forma como um processo atinge as suas metas em termos de unidades de desvio padrão normalizadas; pode também, ser expresso como *taxa de defeitos* ou *nível de qualidade* de uma medida (Sauro, 2005). Se, por exemplo, um processo tem um nível de qualidade correspondente a um desvio padrão acima do limite de especificação, diz-se que, é um processo que tem 2,5 sigma, ou que tem “85% de nível de qualidade”, ou “15% de defeitos”. Todas estas designações são equivalentes.

2.5. Cálculo do Sigma de um Processo

O nível sigma de um processo, ou a sua correspondente taxa de defeitos, ou nível de qualidade, calculam-se por um de dois métodos, dependendo do tipo de dados que estão a ser recolhidos – discretos ou contínuos. Os dados do tipo discreto (erros ou taxas de realização) não podem ser subdivididos em unidades mais pequenas sem perda de significado – não se tem meio erro. Os dados do tipo contínuo podem ser divididos em unidades infinitamente mais pequenas sem perda de significado (Sauro, 2005).

2.5.1. Primeiro Método: dados discretos

Para calcular o sigma de um processo para uma grandeza composta por dados discretos, identificam-se todos os defeitos de uma amostra (ou as medidas que não se encontram dentro do intervalo dos limites de especificação). O número total de defeitos é dividido pelo número total de oportunidades para os defeitos ocorrerem. Para calcular a taxa de defeitos, usa-se a seguinte expressão:

$$\text{Taxa de Defeitos(ou probabilidade de um defeito)} = \frac{\text{Total de Defeitos}}{\text{Total de Oportunidades}} \quad (2.1)$$

O nível de qualidade é então calculado subtraindo a taxa de defeitos à unidade:

$$\text{Nível de qualidade} = 1 - \text{Taxa de Defeitos} \quad (2.2)$$

O nível de qualidade corresponde à área sob a curva normal que representa a parte do processo que não é defeituosa. O valor estandardizado (ou Z) pode ser calculado através de uma tabela da distribuição normal padrão⁶. O nível sigma do processo calcula-se, de seguida, adicionando 1,5 sigma ao valor de z. O valor de 1,5 é adicionado para reflectir as variações de longo prazo no processo, ou seja:

Nível de Qualidade = área desejada sob curva normal padrão (Z)

Nível Sigma do Processo = Z + 1,5 σ

2.5.2. Segundo Método: dados do tipo contínuo

Para calcular o sigma de um processo de uma grandeza que é constituída por dados do tipo contínuo, é necessário realizar os seguintes cálculos:

- Valor Z = (Média da amostra – Especificação) / Desvio Padrão.
- Taxa de Defeitos = área sob a Curva Normal Padrão à direita do valor de Z.

⁶ No MS Excel a fórmula NORMSINV () devolve o valor de z a partir duma probabilidade (ou %) e a fórmula NORMSDIST () calcula uma probabilidade a partir do valor de z

- Nível de Qualidade = $1 - \text{Taxa de Defeitos}$, ou área sob a curva normal padrão à esquerda do valor de Z .
- Sigma do Processo = $Z + 1,5 \sigma$.

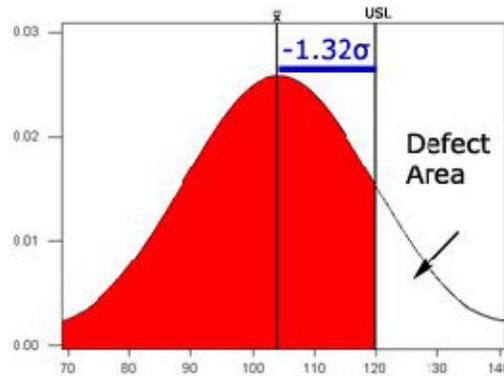


Figura 2.3

Na fig. 2.3, vemos uma curva normal mostrando uma área de defeitos acima do limite de especificação superior (USL) de 120. O valor médio da amostra (\bar{x}) é de 104, e o desvio padrão de 12, dando para Z um valor de $(120-104) / 12 = -1,33 \sigma$ e um nível de qualidade de 91%. O cálculo do sigma do processo pelo método 2 necessita que os dados sejam normalmente distribuídos, aproximadamente. Se isso não acontecer, o método 2 será uma representação imperfeita do verdadeiro nível de qualidade. Caso os dados não estejam normalmente distribuídos, então, o melhor, será utilizar o método 1. A correção de $1,5 \sigma$ entra com factores que não foram levados em linha de conta no modelo mais simples da distribuição normal. A tabela que se segue, retirada de (Pyzdek, 2008), estabelece a equivalência entre o valor sigma de um processo e as partes por milhão, quando se considera o desvio de $1,5 \sigma$.

Nível Sigma	DPMO	Nível Sigma	DPMO
6,27	1	4,66	800
6,12	2	4,62	900
6,00	3,4	4,59	1000
5,97	4	4,38	2000
5,91	5	4,25	3000
5,88	6	4,15	4000
5,84	7	4,08	5000
5,82	8	4,01	6000
5,78	9	3,96	7000
5,77	10	3,91	8000
5,61	20	3,87	9000
5,51	30	3,83	10000
5,44	40	3,55	20000
5,39	50	3,38	30000
5,35	60	3,25	40000
5,31	70	3,14	50000
5,27	80	3,05	60000
5,25	90	2,98	70000
5,22	100	2,91	80000
5,04	200	2,84	90000
4,93	300	2,78	100000
4,85	400	2,34	200000
4,79	500	2,02	300000
4,74	600	1,75	400000
4,69	700	1,50	500000

Assume-se que, no longo prazo, o processo pode derivar $\pm 1,5\sigma$

Tabela 1

Quando os dados são recolhidos, deve-se calcular a média e o desvio padrão. Em seguida, calcular quantos desvios padrão existem entre a média do processo e cada limite de especificação. Calcula-se, depois, as partes por milhão através da tabela correspondentes ao nível sigma. Adicionam-se as PPM (Partes por Milhão) para a especificação inferior e superior e, vê-se, qual é o nível sigma correspondente na tabela. Se os dados forem provenientes de contagens de erros ou defeitos, converte-se a contagem para PPM, utilizando a fórmula $PPM = (\text{numero de erros/oportunidade de erros}) \times 10^6$ e, a partir da Tabela 1, encontra-se o valor para sigma.

A montagem de circuitos impressos é um caso de processo por atributos, onde os artigos rejeitados podem ser considerados como o resultado das especificações interagirem com a variabilidade dos materiais e processos. Neste caso, a metodologia da qualidade está centrada nas taxas de defeitos da produção e, não, nas especificações do produto. Um nível de qualidade Seis Sigma implica uma taxa de defeitos de 3,4 ppm como objectivo

para todos os processos (Shina, 2002). A assunção implícita, é a de que, as variações que ocorrem em todos os parâmetros associados com os processos e, as peças, seguem uma distribuição normal, cujos limites de especificação estão situados a 6 sigma da média do processo (valor alvo nominal). Uma outra premissa, é a de que, a média de um processo pode afastar-se da especificação nominal até 1,5 sigma. Com este afastamento, um dos limites de especificação está a 4,5 sigma da média do processo, em vez de seis sigma, enquanto o outro limite de especificação está a 7,5 sigma da média aonde os defeitos podem ser ignorados, por serem desprezáveis. Isto tem, como consequência, uma taxa de defeitos baseada numa distribuição normal uni-caudal de 3,4 ppm. Esta taxa é o resultado da intersecção da curva de distribuição normal com o limite de 4,5 sigma.

Uma das vantagens do Seis Sigma é que a qualidade de projecto pode ser descrita como um simples índice, igual a $C_p = 2$. Uma das desvantagens que se verifica, é quando a média do processo em análise não é igual à especificação nominal (valor alvo). Neste caso, a taxa de defeitos não é bem determinada, e depende deste desvio. A capacidade de processo refere-se a um conjunto de métricas (KPI⁷) que nos dão a capacidade de um processo satisfazer os requisitos do consumidor (Quentin Brook, 2008). A capacidade de um processo acaba por ser a comparação entre a VOP (*Voice Of Process*) e a VOC (*Voice Of Consumer*).

O Seis Sigma está focado na previsão da taxa de defeitos produzidos à primeira tentativa (FTY⁸), baseada na interacção dos parâmetros do processo com as tolerâncias especificadas. O desvio de 1,5 σ , que é aceite em certas definições do Seis Sigma, conduziu a confusões sobre o cálculo de defeitos e rendimento da produção (FTY). A definição do índice C_{pk} veio, de certa forma, resolver esta questão. Quando o desvio da média do processo em relação à especificação nominal é nulo, então $C_p = C_{pk} = \pm SL/6\sigma$, sendo SL os limites da especificação de fabrico.

Quando, porém, há um deslocamento da média do processo, o valor de C_p não é igual ao valor de C_{pk} e, o valor de C_{pk} , é sempre inferior a C_p . O índice C_{pk} e, a definição de Seis Sigma, podem ter interpretações diferentes quando se consideram processos com atributos. Trata-se de processos de produção, em que somente se consideram as taxas de

⁷ Key Performance Indexes.

⁸ First Time Yield

defeitos e, em que, não há limites de especificações a considerar. Está incluída nesta classificação, a montagem de circuitos impressos.

Os defeitos de qualidade podem ser calculados através da taxa de defeitos, calculada por meio do índice Seis Sigma, ou do C_{pk} , a partir da interação do processo produtivo com os limites de especificação do produto ou serviço. Assume-se que, as características do processo de produção estão distribuídas normalmente. Para processos de atributos, (aqueles em que a qualidade é medida em termos de defeitos numa amostra, ou pelo número de bens defeituosos), tem que se calcular implicitamente C_{pk} para se proceder à avaliação da qualidade da produção. Neste caso, os defeitos decorrem da violação de uma especificação particular ou de uma especificação composta. A especificação composta pode ser uni-caudal ou bi-caudal, dependendo da interpretação que se atribui aos defeitos (Shina, 2002).

Para defeitos de soldadura, uma especificação composta pode ser assumida como bi-caudal, uma vez que os defeitos de soldadura podem ser de dois tipos, provocados por excesso de solda ou por falta dela (Shina, 2002). A diferença entre especificações implícitas, mono ou bi-caudais, é que, o número de defeitos, representando o valor da função $f(z)$ da curva normal padrão, deve ser dividido por dois para as especificações bi-caudais.

Os defeitos de soldadura são expressos normalmente em partes por milhão (ppm) de defeitos obtidos na produção, divididos pelo número total de soldaduras no produto (número total de oportunidades). Um processo de 100 ppm (100 defeitos de soldadura em cada 10^6 oportunidades) tem um $C_{pk} = z/3 = 1,3$ se assumirmos que a distribuição é simétrica, ou seja, há 50 ppm de defeitos em cada ramo da curva. 50 ppm correspondem a $f(z) = 0,00005$, ou a $z = 3,89$ na distribuição normal padrão. Os pressupostos de que se parte, são os de que os defeitos podem ocorrer em qualquer dos lados da distribuição, que o processo é normalmente distribuído, e que a média do processo é igual à especificação nominal (valor alvo). Se assumirmos, porém, que há um deslocamento da média de $1,5\sigma$, então todos os defeitos resultam de um dos lados da distribuição, enquanto o outro lado da curva de distribuição tem um nível de defeitos desprezável. O nível sigma do processo é então de $3,89\sigma + 1,5\sigma = 5,22$ na definição clássica do Seis Sigma.

Os índices da capacidade do processo permitem-nos uma avaliação da forma como um processo produtivo satisfaz as expectativas dos clientes ou consumidores, mas, como são índices abstractos sem dimensões de unidades, nem sempre é fácil interpretar o resultado das mudanças que resultam da melhoria dos processos produtivos somente através da análise destes indicadores. A quantificação através das PPM (Partes Por Milhão), que não está vinculada aos limites de especificação do processo, pode ajudar a superar esta insuficiência. Este indicador diz-nos quantas partes por milhão produzido estão defeituosas.

A estimativa do número de artigos defeituosos em cada milhão produzido, torna mais simples, para qualquer pessoa, avaliar e visualizar o nível de qualidade de um processo de produção. De uma forma geral, um dos pressupostos de que se parte para uma análise da capacidade de um processo é a distribuição normal dos dados. Os valores de C_{pk} e PPM são calculados usando a distribuição normal padrão z , admitindo que os dados analisados são normalmente distribuídos. Se adoptarmos esta opção para o cálculo da capacidade do processo e a admissão da normalidade dos dados for violada, porque a distribuição é assimétrica de uma forma ou outra, os valores resultantes para C_{pk} , C_p e PPM não reflectem a capacidade real do processo.

No entanto, nem todas as saídas de processos são distribuídas normalmente. Se os dados a analisar não são distribuídos normalmente, uma das alternativas a utilizar para fazer uma análise de capacidade é utilizar a distribuição que, de facto, os dados realmente seguem. A outra, é usar uma transformação estatística para calcular os índices da capacidade do processo como se eles fossem distribuídos normalmente. Seguiremos, no caso da **Tecnimaster**, a primeira opção. Utilizámos, com essa finalidade, a aplicação informática MINITAB que dispõe de uma opção para este cálculo quando os dados a analisar seguem uma distribuição de Poisson. Ora, é este o caso da distribuição dos dados da amostra utilizada no projecto de melhoria realizado na empresa em estudo.

2.6. Cálculo do Rendimento da Produção (*Yield*)

O cálculo do rendimento de um processo (*Yield*), é baseado na definição de probabilidade de obter um defeito. Um processo de fabrico é composto por várias

etapas, cada uma delas gerando a sua própria variabilidade e, contribuindo, para a taxa de defeitos geral. No caso de uma operação com várias fases, a qualidade dos respectivos processos individuais tem de ser muito elevada, para que o rendimento geral do processo seja aceitável, uma vez que, o rendimento geral é o produto dos rendimentos intermédios. No caso da montagem de circuitos impressos, com 5-10 fases, têm de existir vários pontos de inspecção, ou teste, para suprimir os defeitos que surgem em cada fase, de tal forma que, possam ser produzidas unidades boas quando se completarem todas as fases do processo global. É importante medir a qualidade em termos do número total de defeitos descobertos em qualquer fase do processo e, se possível, antes de qualquer ponto de inspecção ou teste.

As métricas utilizadas têm a ver com o rendimento da primeira vez (FTY), e, com os defeitos por unidade (DPU), expressos em PPM (Partes por Milhão). Mais recentemente, o uso do termo (DPMO) tem vindo a ser privilegiado para reduzir a confusão na forma de calcular as taxas de defeitos em processos multi-fase complexos tais como a fabricação de circuitos impressos (Shina, 2002). A definição básica de defeito é aquela que é baseada na distribuição de Poisson (Shina, 2002). A taxa de defeitos, ou o número de defeitos por unidade (DPU), calcula-se baseando-nos nos defeitos, oportunidades e unidades (ver equação 2.3). Podemos considerar como defeitos quaisquer desvios às funções para as quais o produto foi concebido que causam a insatisfação do cliente, ou a não conformidade com as especificações de fabrico.

$$DPU = \frac{\text{Número de Defeitos}}{\text{Número de Unidades Processadas}} \quad (2.3)$$

$$DPU(PPM) = DPU \times 10^6 \quad (2.4)$$

O rendimento inicial de produção (FTY) é a percentagem de unidades produzidas sem defeitos antes de qualquer teste ou inspecção (equação 2.5). É diferente do rendimento de produção tradicional que inclui a reparação do produto com defeito e as correcções efectuadas nas unidades defeituosas. O FTY é a medida básica da capacidade real dum processo, ou da capacidade de produzir bem à primeira vez (Gygi, 2006).

$$FTY = \frac{Entradas - (Sucata + Correções)}{Entradas} \quad (2.5)$$

A distribuição de Poisson é uma boa base para o cálculo de defeitos, especialmente quando o número de possibilidades para a ocorrência de defeitos é grande e, a probabilidade de obter um defeito, em qualquer instante de tempo ou região do espaço, é pequena. A equação de Poisson pode ser simplificada para:

$$p(x, \lambda) = e^{-\lambda} \left(\frac{\lambda^x}{x!} \right) \quad (2.6)$$

P (pelo menos um defeito) = 1 - P (não haver defeitos ou X=0) = 1 - e^{-λ} (λ⁰/0!)

FTY = 1 - P (pelo menos um defeito) = 1 - (1 - e^{-λ}) = e^{-λ}

Quando uma montagem é composta por várias operações similares, como é o caso das soldaduras num circuito impresso, então o cálculo do FTY para o conjunto pode ser efectuado a partir dos DPU das operações individuais. Muitas vezes, este rendimento total é referido como RTY⁹ para o distinguir do FTY.

Uma vez que λ = np = DPU (Defeitos por Unidade) vem,

$$FTY = e^{-DPU} \Rightarrow DPU = -\ln(FTY) \quad (2.7)$$

Em percentagem, vem $FTY = e^{-DPU} \times 100\%$ e,

$$\% \text{ Defeitos} = (1 - e^{-DPU}) \times 100\% \quad \text{ou,} \quad \% \text{ Defeitos} = (1 - FTY) \times 100\%$$

Também,

$$RTY = \prod_{i=1}^n FTY_i \quad \text{e,} \quad RTY = e^{-\Sigma DPU} \quad (2.8)$$

Em sistemas de qualidade com o nível Seis Sigma os defeitos por unidade (DPU) são muito pequenos, e pode-se fazer uma aproximação sem comprometer a precisão das estimativas do rendimento do processo. Fazendo um desenvolvimento em série de potências da equação 2.7, vem:

$$FTY = e^{-DPU} = 1 - \frac{DPU}{1!} + \frac{DPU^2}{2!} + \dots + (-1)^{n+1} \frac{DPU^n}{n!} \quad (2.9)$$

⁹ Rolled Throughput Yield

Desprezando todos os termos, excepto os dois primeiros, na expressão 2.9, vem:

$$FTY = 1 - DPU = 1 - \left(\frac{N^{\circ} \text{ Defeitos}}{N^{\circ} \text{ Oportunidades}} \right) \quad (2.10)$$

e, $RTY = (1 - DPU)^n$, sendo n o número de operações que podem gerar defeitos.

2.8. O Ciclo DMAIC

O Seis Sigma é uma abordagem quantitativa e disciplinada que envolve o estabelecimento de um sistema e, de processos, para a melhoria das métricas definidas em processos de manufactura ou de serviços. Utiliza um método estruturado de melhoria que está formatado de acordo com o ciclo PDCA¹⁰ de Deming e Shewhart (Schroeder, 2008; Xingxing, 2008). O ciclo DMAIC¹¹ (ver fig. 2.5, p. 31), fornece uma meta-rotina que os colaboradores das organizações seguem para resolver problemas e melhorar os processos. Seguir um método estruturado evita que se tirem conclusões precipitadas, não baseadas em factos, e ajuda na pesquisa de soluções alternativas para os problemas (Schroeder, 2008). Esta abordagem conduz o processo geral da escolha de projectos de melhoria baseando-se nos objectivos de negócio da organização e, seleccionando e treinando as pessoas certas, para obter resultados. Os projectos de melhoria seguem um processo disciplinado, definido pelo conjunto das cinco fases macro do ciclo DMAIC.

Em cada fase da melhoria, são utilizadas as ferramentas padrão da qualidade, tais como a FMEA¹², os diagramas de causa e efeito e o controlo estatístico do processo (Linderman, 2006). Após a definição do projecto de melhoria as características críticas do processo são identificadas, comparadas através de *benchmarking* e, estudadas, nas fases de *Measure* e *Define*. Na fase *Define*, o objectivo principal consiste na definição da melhoria a realizar. Nesta fase, a atenção vira-se para os requisitos do consumidor. Estes, são utilizados para definir as variáveis críticas para a qualidade (CTQ¹³).

¹⁰ *Plan, Do, Check, Act*

¹¹ *Define, Measure, Analyze, Improve, Control*

¹² *Failure Modes and Effects Analysis.*

¹³ *Critical To Quality*

Uma vez recolhidas e categorizadas as expectativas e os requisitos dos clientes, devem ser traduzidos numa terminologia específica e mensurável, referida como CTQ (*Critical To Quality*). As características CTQ costumam ser utilizadas para avaliar a forma como o processo em escrutínio se comporta e vai de encontro às necessidades e requisitos do cliente. Podem também, ser utilizadas, para aferir a forma como os produtos correntes vão de encontro às necessidades dos clientes. Esta técnica tem ainda a possibilidade de ser usada para seleccionar opções de melhoria do processo.

A fase **Measure** monitoriza as variáveis CTQ para verificar a sua conformidade com os limites das especificações de controlo (LCL e UCL). Os dados para as variáveis críticas de controlo são analisados e utilizados para calcular o número de defeitos por milhão de oportunidades (DPMO) (Dassau, Zadok & Lewin, 2006).

$$DPMO = (1 - \int_{LCL}^{UCL} f(x)dx) * 10^6 \quad (2.11)$$

Sendo $f(x)$ a probabilidade de que a qualidade tenha um valor de $x \in (x, x + dx)$. O UCL e LCL são o limite superior e inferior de controlo, respectivamente. De acordo com Strong (2004), o nível sigma de um processo é inversamente proporcional ao seu DPMO. Segue-se então, a fase **Improve**, na qual se utilizam técnicas como o DOE¹⁴, para melhorar o desempenho do processo (Goh, 2003). O resultado pode ser avaliado através do nível sigma, a que corresponde um certo número de defeitos por milhão de oportunidades.

Quando o nível sigma fica abaixo do estabelecido, devem-se efectuar acções para o aumentar, começando por definir as causas mais significativas para o excesso de variabilidade - **Analyze**. Tendo-se identificado as principais causas comuns da variabilidade, estas são eliminadas, ou atenuadas, pela reformulação do processo de fabrico e pelo emprego do controlo do processo - **Improve**. Na fase **Control**, os ganhos de qualidade que se obtiveram são assegurados e mantidos, por intermédio de várias técnicas, entre as quais se pode referir o SPC, ou controlo estatístico do processo (Dassau et al., 2006). Como o desempenho de um processo é calibrado em DPMO em

¹⁴ *Design of Experiments*

termos de Seis Sigma, o controlo e a monitorização estatística desta fase são efectuados, geralmente, através de amostras de atributos e cartas de controlo, tais como a np ou p, em que n é o tamanho da amostra e p é a proporção de não conformes do processo.

As fases do ciclo DMAIC podem ser descritas, mais detalhadamente, da forma que se segue:

Define – Consiste na definição dos objectivos do projecto a partir da identificação dos requisitos dos clientes, na definição dum mapa de processo e, na constituição de um grupo de trabalho, ou seja:

- Identificar o produto ou processo para melhoria, identificar os clientes e, traduzir as suas necessidades, em características CTQ.
- A escolha do grupo de trabalho envolve a selecção dos componentes, atendendo às suas características pessoais e técnicas, a definição das suas contribuições, a definição do problema e dos objectivos a atingir, as fases do projecto e a preparação de um estudo para obter a adesão da gestão de topo.
- Realizar um mapa de processo de alto nível que ligue o cliente ao processo e ao resultado final.

Measure – Medir os sistemas existentes. Estabelecer métricas válidas e confiáveis que ajudem a monitorizar os progressos do projecto na obtenção dos objectivos propostos. As expectativas dos clientes ajudam a monitorizar o progresso e, são examinadas, para se determinar quais as especificações que não as satisfazem.

- Identificar e descrever os processos e produtos críticos. Listar e descrever todos os potenciais processos críticos, obtidos a partir de sessões de *brainstorming*, dados históricos, relatórios de produção (*yield*), relatórios de análise de falha e modelos dos principais problemas.
- Realizar a análise do sistema de medida. Determinar a precisão (incerteza da medida), exactidão, repetibilidade e reprodutibilidade (R&R) de cada instrumento de medição para verificar a sua capacidade.

Analyze – Analisar o sistema, para identificar formas de eliminar a diferença entre o desempenho actual do processo e o objectivo pretendido. Nesta fase, as equipas de projecto exploram as causas subjacentes aos defeitos. Utilizam, para isso, análise estatística para examinar as variáveis que potencialmente influenciam os *outputs* do

processo e, procuram descobrir, quais as causas principais mais significativas. Então, podem detectar uma série de factores que influenciam o resultado desejado para o processo. Com esse propósito, efectuam os seguintes passos:

- Isolar e verificar os processos críticos. Reduzir a lista dos potenciais problemas aos críticos (*vital few*) (Juran & Godfrey, 2000). Identificar as relações entre as entradas e saídas que afectam directamente os problemas específicos. Verificar as causas potenciais da variação dos processos e dos problemas dos produtos.
- Realizar medidas da capacidade do processo e do sistema de medida (R&R). Identificar e definir as limitações dos processos. Assegurar que os processos são capazes de atingir o seu potencial máximo. Identificar e, remover, todas as variações devido às causas especiais. Determinar o grau de realismo das especificações (Messina, 1999). Calcular os intervalos de confiança. Um processo é considerado capaz quando está sob controlo, é previsível e estável.

Improve – Nesta fase, as equipas de projecto procuram a melhor solução e, desenvolvem e testam um plano de acção, para implementar e confirmar a solução. O processo é modificado e, a saída, é medida, para determinar se o método revisto produz resultados de acordo com as especificações do consumidor. As técnicas utilizadas, são as seguintes:

- Realizar experiências (DOE) – seleccionar os factores e os níveis. Planear a execução da experiência. Executar a experiência para determinar quais os factores mais significativos.
- Implementar avaliações e projectos de redução da variabilidade. Implementar acções correctivas permanentes para impedir as variações devidas a causas especiais. Demonstrar a estabilidade do processo e a sua previsibilidade.

Control - Controlar o novo sistema. Devem ser implementadas medidas para impedir que o problema torne a ocorrer. Institucionalizar a melhoria do sistema através da modificação de políticas, procedimentos, instruções de operação e outros mecanismos de gestão.

- Especificar os métodos de controlo do processo. Estabelecer controlos permanentes para o processo, baseados na prevenção da ocorrência das causas especiais, através da utilização de técnicas de controlo estatístico do processo.

- Documentar a melhoria dos processos. Registrar todos os passos/processos da fase de melhoria usando, por exemplo, uma árvore de decisão e um plano de reacção.

A implementação Seis Sigma é conseguida através da realização de uma série de projectos com sucesso. Os projectos podem ser de duração e tamanho variáveis. Temos de definir um projecto como uma abordagem estruturada e sistemática para atingir níveis de melhoria Seis Sigma (Lennartsson, 2004). Por sua vez, um processo pode ser caracterizado como uma actividade, ou série de actividades, que transformam entradas em saídas, num fluxo contínuo e repetitivo (ver fig. 2.4):

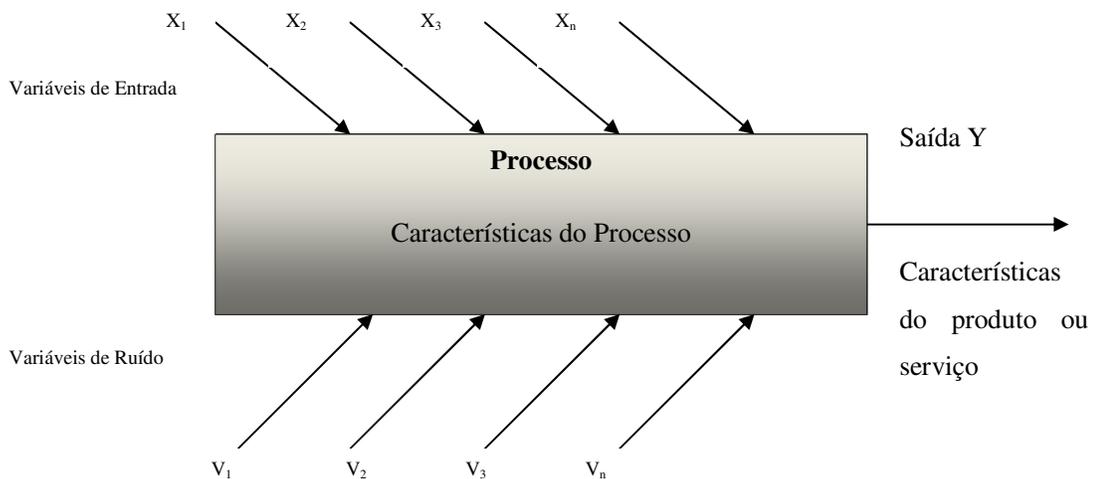


Figura 2.4 – O Processo

Pyzdek (2003), refere a importância de escolher o indivíduo certo para actuar como coordenador de projecto mesmo antes de a equipa de projecto ser submetida a treino específico. Os métodos de actuação são geralmente ensinados no contexto de projectos de melhoria do sistema e, a capacidade dos executantes, é muitas vezes caracterizada por meio de uma analogia com os cintos de karaté: cintos negros, cintos verdes, etc. Um dos benefícios principais do treino Seis Sigma é o de simplificar a sequência e a escolha das técnicas disponíveis a aplicar num caso específico. Por conseguinte, o valor do movimento Seis Sigma deriva da normalização dos métodos de resolução dos problemas e, em parte, da forma como guia as pessoas na sugestão dos métodos e

ferramentas a aplicar num projecto de melhoria. Alguns autores, afirmam que, a eliminação de defeitos e, a prevenção associada ao Seis Sigma, pode conduzir a melhorias dos resultados financeiros.

Como já foi dito, na fase de definição, é importante estabelecer quais os projectos com características Seis Sigma. O objectivo desta fase é especificar todos os elementos relacionados com o projecto, incluindo a razão para a sua implementação, o problema a ser resolvido, o objectivo a ser atingido, e os benefícios esperados. Um das técnicas que pode ser utilizada para este efeito e, que iremos usar no caso da **Tecnimaster**, é a construção de um mapa de processo. É necessário, por outro lado, entender os requisitos dos clientes em moldes específicos. Ou seja, traduzir os requisitos dos clientes em linguagem concreta, mensurável, para poder ser incorporada na melhoria do processo a tratar.

De acordo com Bañuelas (2005) a metodologia DMAIC é recomendada, apenas quando, a causa do problema é desconhecida ou pouco clara, o potencial para poupança de custos existe, e o projecto pode ser executado entre quatro a seis meses. Além disso, é importante dar prioridade às áreas com potencial de melhoria. Esta metodologia é importante para a realização do presente trabalho, uma vez que, o que se pretende, é executar um projecto de melhoria de processo. Será aplicada como suporte ao projecto de Estudo de Caso que se levou a efeito na empresa **Tecnimaster**, como se poderá constatar no Capítulo III e seguintes.

Pande et al. (2002), são os autores que contribuíram provavelmente para a mais completa e explícita versão dos métodos associados ao Seis Sigma. Contudo, mesmo a sua versão da metodologia deixa considerável latitude aos utilizadores das técnicas e ferramentas Seis Sigma para as adequar às suas aplicações específicas e aos seus próprios gostos pessoais. A metodologia DMAIC do Seis Sigma é baseada, principalmente, em métodos estatísticos e ferramentas de gestão de projectos e, é utilizada, para eliminar as fontes de variação. O Seis Sigma propõe que se estabeleça um nível de qualidade quase a atingir a perfeição através da aplicação sistemática da metodologia DMAIC a uma lista hierarquizada de problemas. Contudo, as práticas do DMAIC não se limitam ao Seis Sigma. Uma empresa pode implementar qualquer subconjunto destas práticas sem se referir à combinação como fazendo parte dum projecto Seis Sigma (de Treville, 2004).

O Seis Sigma enfatiza a utilização de métricas para a melhoria contínua, tais como a medida de processo Sigma, as métricas CTQ (*Critical To Quality*), as medidas de defeitos, as melhorias de 10 x, bem como as medidas de qualidade tradicionais, tais como a capacidade de processo (Breyfogle, 2003; Pyzdek, 2003). As abordagens estruturadas para a melhoria do Seis Sigma, a sua focagem nas métricas, são duas práticas nucleares, na medida em que, representam os elementos metodológicos do Seis Sigma na utilização de métodos científicos, ferramentas estatísticas e métricas quantitativas (Xingxing, 2008).

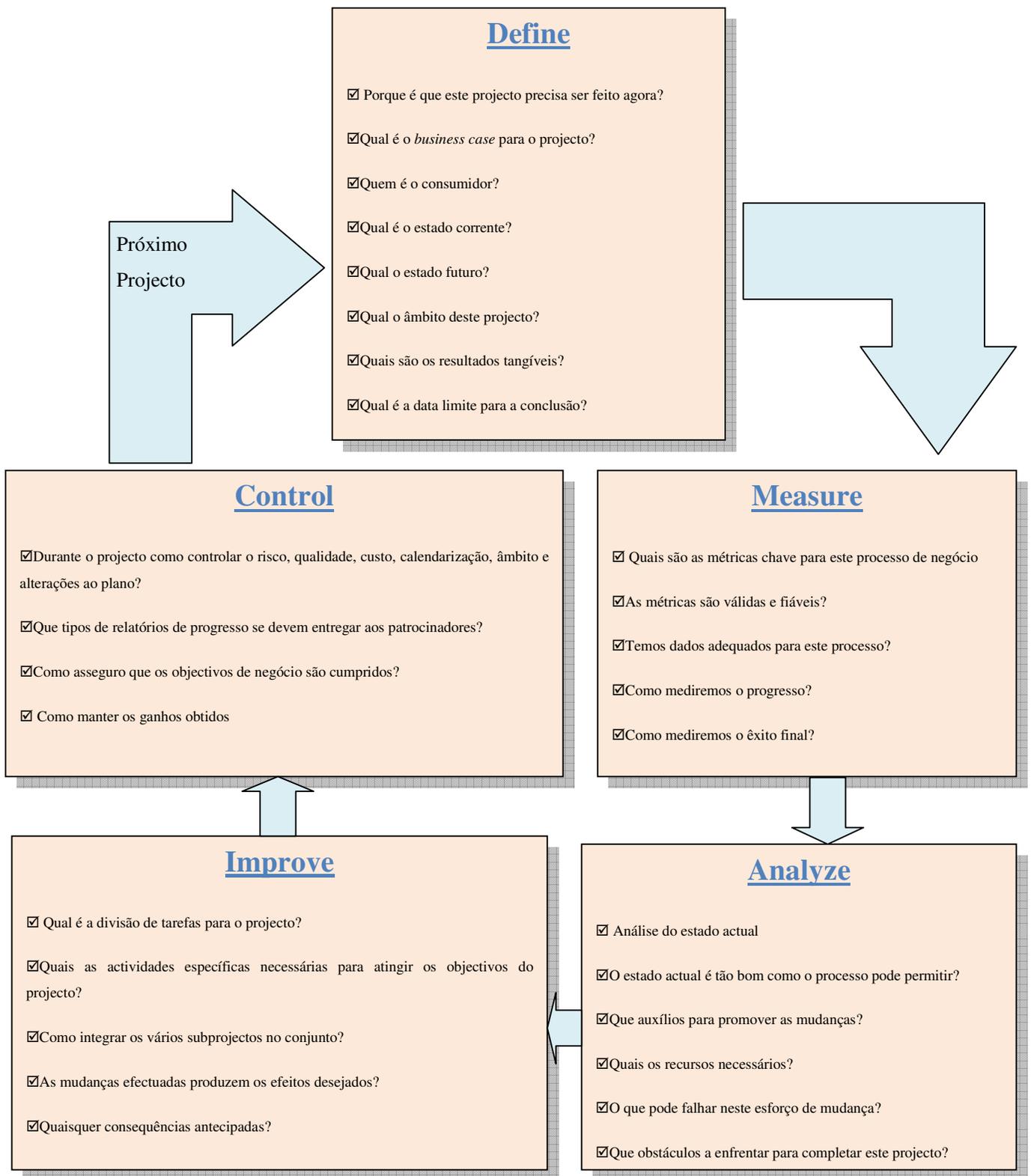


Figura 2. 5 – O Ciclo DMAIC. Fonte: Pyzdek (2003)

2.9. Ferramentas para o Seis Sigma

A metodologia Seis Sigma utiliza ferramentas de qualidade padrão tais como a FMEA, gráficos de causa e efeito e o controlo estatístico do processo (Breyfogle, 2003; Schroeder, 2008). Estas ferramentas incluem muitas das sete ferramentas clássicas do controlo da qualidade e as ferramentas para diagnóstico e formulação de problemas (Schroeder, 2008). O método DMAIC é consistente com o modelo de resolução de problemas por fases do ciclo PDCA e, coloca nova ênfase, na integração de ferramentas específicas em cada uma das fases do método. O ciclo DMAIC (ver fig. 2.5, p. 31) é repetido continuamente, de forma a melhorar a qualidade do processo. Note-se que, atingir o desempenho correspondente ao Seis Sigma é raramente o objectivo e, raras vezes, este é atingido (Dassau et al., 2006). No caso que se pretende tratar neste trabalho, é exactamente isto que se passa. De facto, como se poderá constatar no desenvolvimento subsequente, a melhoria que se conseguiu obter no processo escolhido não atinge os seis sigmas. Contudo, além de não ser esse o propósito inicial, não invalida que se tenha atingido o objectivo proposto, tanto mais que, atingir melhorias ao nível dos seis sigmas exige recursos de tempo e financeiros não compatíveis com a capacidade da empresa em estudo.

2.9.1. O Mapa de Processos

Na fase *Define*, da metodologia DMAIC, é importante que as equipas de projecto conheçam as fronteiras do mesmo. Podemos definir um processo como uma série de actividades encadeadas e interdependentes, com entradas e saídas. Isto parece simples, mas, muitas vezes, os processos são variados e complexos (Pande et al., 2002). Durante as primeiras fases do projecto, é necessário desenhar um mapa de processos com o detalhe suficiente, para se poder começar com o processo de análise e medida. Em geral, as equipas de projecto partem dum mapa de processos de nível macro, pouco detalhado, como se estivessem a fotografar os processos de grande altitude, referindo só, as principais actividades e passos. Esta técnica, que se irá utilizar no projecto de melhoria levado a efeito na **Tecnimaster**, dispõe esquematicamente uma série de actividades inter-relacionadas e as actividades que transformam as entradas em saídas.

Os resultados finais são função dos processos e das entradas utilizadas para a sua produção. Isto pode-se traduzir na equação matemática $Y = f(X)$, em que Y representa a saída de um processo, e X, o processo principal, em conjunto com as suas variáveis de entrada. O Mapa de processo é uma representação gráfica desta equação. Um mapa de processos é, pois, um ponto de partida para uma iniciativa de melhoria (ver fig. 4.3, p. 104).

Outra das ferramentas que pode ser utilizada para o efeito é o diagrama SIPOC (*Supplier, Input, Process, Output*) (Stagliano, 2004).

Esta ferramenta é útil no início dum projecto para nos dar uma perspectiva geral do processo a ser tratado. É uma boa ferramenta de comunicação que resume o enfoque do projecto – o processo que nos interessa tratar e os seus elementos relacionados (Hambleton, 2008). É um diagrama de cinco elementos chave, dispostos em coluna, para fornecer a seguinte informação:

- *Suppliers* – As funções principais (desempenhos ou pessoas) que produzem as entradas do processo.
- *Inputs* – As informações chave, componentes, decisões, contribuições que são necessárias antes do começo ou fim de uma actividade ou tarefa.
- *Process* – As actividades de alto nível dum processo (tipicamente três a oito actividades) que transformam as entradas em saídas.
- *Outputs* – As saídas dos elementos tangíveis principais do processo.
- *Clientes* – Os clientes principais (externos ou internos) que solicitam as saídas ou entregas do processo.

Frequentemente, esta ferramenta é construída de jusante para montante na cadeia de fornecimento, a começar pelo cliente (*customer*) e, trabalhando no sentido do fornecedor (*supplier*), dado que, são os clientes que acabam por definir, ou determinar, as entregas ou saídas do processo com interesse. Os clientes fornecem aquilo que se costuma designar por voz do cliente (VOC – *Voice of the Customer*). As saídas do processo representam os produtos, serviços, ou informação, entregues à fase seguinte, quer sejam intermediários ou finais, que necessitam de ser melhorados (Hambleton, 2008).

As saídas dos processos (variáveis ou atributos) são mensuráveis. Os elementos de alto nível dos processos limitam-lhes o âmbito e, contêm os elementos, que podem ser considerados como potenciais fontes geradoras das causas principais de perturbação. As entradas dos processos também podem ser consideradas como fontes originadoras de causas potenciais de perturbação. Os fornecedores principais devem ser envolvidos nesta iniciativa do processo de melhoria.

Ao realizar um mapa SIPOC deve-se ter bem presente quando o processo se inicia e acaba. Toda a equipa de projecto deve ser envolvida e, deve existir concordância, quanto aos limites do projecto. As responsabilidades devem ser bem definidas entre os elementos constituintes da equipa. Nesta fase, não se deve ser demasiado ambicioso ao estabelecer as fronteiras do processo que queremos estudar e melhorar. Tentar tratar demasiado, simultaneamente, é uma boa forma de desperdiçar recursos e perder o enfoque, acerca do que, o cliente do processo realmente deseja. Não nos devemos perder em demasiados detalhes e, devemos limitar-nos, a um mapa de alto nível do processo.

Depois de feito o mapa SIPOC, ou equivalente, a equipa de projecto pode debruçar-se sobre os passos onde as causas suspeitas, formuladas no enunciado do problema inicial, se encontram. Um mapa SIPOC, ou ferramenta equivalente, é geralmente suficiente numa primeira fase de tratamento da melhoria do processo. Contudo, podem ser utilizados mapas de processo mais detalhados (Pande et al., 2002).

É necessário ainda, na fase *Define*, auscultar os requisitos do consumidor (Deming, 2000). Outros autores, salientaram a importância de entender os requisitos actuais e futuros dos consumidores na concepção de novos produtos e serviços. Compreender a verdadeira necessidade dos clientes está na raiz do Seis Sigma. Um aspecto fundamental da metodologia Seis Sigma é a identificação das características críticas da qualidade (CTQ) que são vitais para a satisfação do consumidor (Schroeder, 2008). Como consequência, a linha base e, o nível sigma desejado para o processo a melhorar, são, de facto, definidos de acordo com os requisitos do consumidor. Pode não ser suficiente a elaboração de uma lista simples de requisitos para atingir aquele objectivo. Nesse caso, uma das técnicas de que se dispõe é designada por QFD – *Quality Function Deployment*. Trata-se dum método que parte da análise específica dos requisitos dos consumidores e que verifica se estes são cumpridos e satisfeitos.

2.9.2. O QFD

O QFD é um processo iterativo que procura refinar continuamente os requisitos do consumidor atingindo níveis crescentes de detalhe e especificidade (Pande et al., 2002). É composto por um ciclo de quatro fases:

1. Traduzir as necessidades do consumidor e da concorrência nas características do produto ou serviço (elementos básicos do projecto).
2. Transpor as características do produto/serviço para especificações e medidas.
3. Traduzir as especificações e medidas do produto/serviço nas características da concepção do processo (como é que o processo produzirá as características a partir das especificações?).
4. Traduzir as características da concepção do projecto em especificações de desempenho do processo e medidas.

Igualmente importante, é a relação entre estes elementos, que deve ser avaliada de forma contínua, através da correlação entre os elementos e da sua prioridade. O grau de relação entre características, requisitos e capacidade dos processos, é então utilizado para informar as decisões e opções do projecto. O QFD inclui uma matriz de relacionamento (ver fig. 2.6, p. 36) e um número de secções de análise que lhe estão associadas. No seu núcleo, o QFD, tem estas características comuns:

- Entradas do QFD e condições de partida – cada **linha** descreve um requisito, ou aquilo que o Dr. Yoji Akao, um dos fundadores do QFD, designava por “qualidade solicitada” (Hallowell, 2004).
- Cada **coluna** descreve uma resposta mensurável à qualidade solicitada – algo que o fornecedor da solução proporá para implementar e medir, de forma a satisfazer os requisitos. Esta é a voz do fornecedor da solução (e.g., concepção, construção ou teste), que diligenciará no sentido de satisfazer os requisitos.
- Cada **célula** pergunta à equipa de projecto para avaliar a relação entre a intersecção de uma linha com uma coluna.

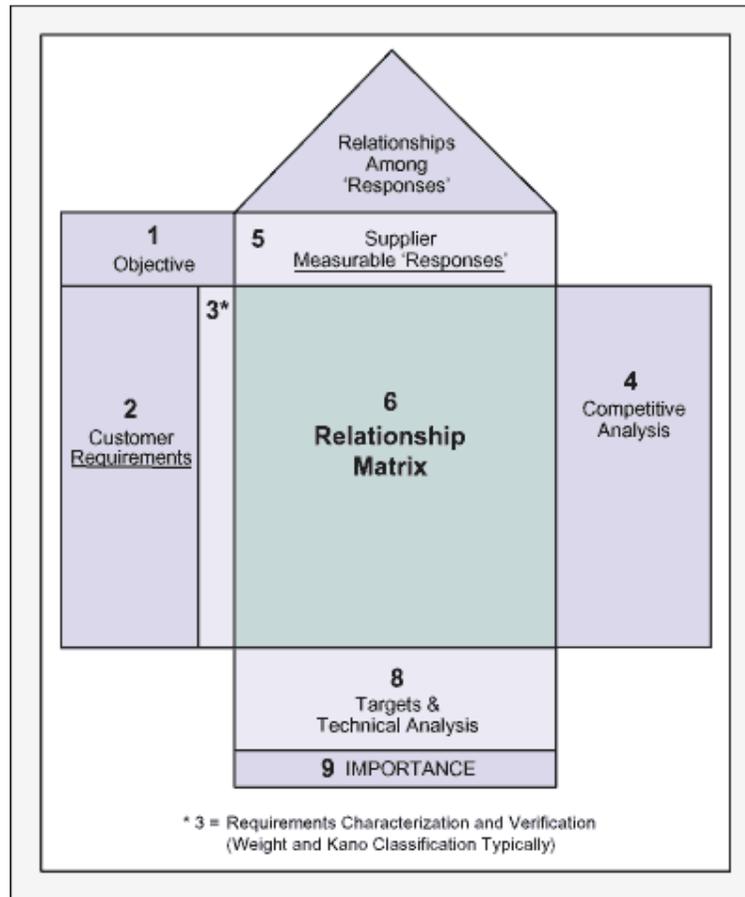


Figura 2. 6 – QFD. Fonte: Hallowell (2006)

Muitas das causas das falhas dos projectos de melhoria Seis Sigma podem ser atribuídas a erros que podiam ser evitados na fase *Define* do ciclo DMAIC. As omissões e falhas permitidas nesta fase podem perseguir a equipa de projecto através de todo o percurso do trabalho realizado (Pande et al., 2002). Se não forem atempadamente corrigidas, poderão inviabilizar a obtenção do objectivo que a equipa de projecto se tinha proposto inicialmente. Eis algumas das falhas mais comuns, as suas causas, e medidas de prevenção que podem ser tomadas para as evitar:

- **A definição do problema a tratar é a solução para um problema secundário** – em vez de procurar encontrar as causas de um problema, a equipa de projecto tenta soluções de remedeio atrás de soluções de remedeio, sem aplicar uma solução permanente. Isto acontece porque, o grupo de projecto, na sua primeira experiência DMAIC, não compreende que um problema é uma diferença no desempenho (“*gap*”), ou a manifestação de defeitos de alto nível, com causas desconhecidas. O problema pode ser devido a acontecimentos inesperados (“ou causas especiais”) ou a uma variação normal de desempenho do processo (ou “causas comuns”). Em qualquer dos casos, não se conhece com certeza a causa

real ou causas, ou seja, a formulação do problema deve ser apenas uma descrição dos sintomas gerados por causas subjacentes (Pande et al., 2002). Isto pode representar uma mudança de paradigma em algumas empresas, em que a assunção de que se está a pesquisar um problema, do qual não se conhece a causa, não é a melhor forma de ser reconhecido e promovido. Muitas das ferramentas do DMAIC são concebidas especialmente para sondar e descobrir as causas dos problemas e, não, para arranjar simplesmente soluções temporárias de disfarce, que podem, ou não, satisfazer os requisitos dos clientes.

- **O projecto é muito vasto e impreciso** – O grupo de trabalho não progride, gastando o seu tempo na tentativa de estreitar o âmbito e enfoque do projecto. Este erro é especialmente comum nos principiantes em projectos Seis Sigma. Julgando que a fórmula DMAIC é alguma poção mágica, iniciam projectos de largo espectro que necessitam de inspeccionar um processo nuclear completo tal como as vendas ou o *marketing*.
- **Falta de requisitos mensuráveis dos consumidores** - O grupo de trabalho assume quais são os requisitos dos consumidores e define o projecto de acordo. Descobrir o que os clientes realmente querem e, depois medi-lo, não é fácil. Muitas vezes, as pessoas pensam que já conhecem o que os clientes querem, quando, de facto, partem das suas próprias percepções sobre aquilo que os clientes desejam. Finalmente, é necessário traduzir os desejos dos clientes em requisitos mensuráveis.

Em parte, estas falhas resultam da inexperiência em trabalhar com a metodologia DMAIC, e, do facto, de que, os primeiros problemas a tratar não podem ser muito abrangentes ou os projectos arrastar-se-ão indefinidamente. Também a gestão comete o erro de, por vezes, julgar que, ao propor grandes objectivos para resolver, far-se-á mais trabalho. Geralmente, a falta de dados disponíveis e, o tempo necessário para a sua recolha, encarrega-se de manter o âmbito do projecto estreito. É preferível, para uma equipa de projecto sem grande experiência, obter uma série de pequenos sucessos do que tentar obter uma grande vitória, que provavelmente nunca acontecerá.

O QFD é um processo estruturado que nos fornece um meio de identificar e transportar as necessidades dos clientes através de cada fase do desenvolvimento dum produto e da sua implementação. É uma ferramenta de concepção e desenvolvimento, pilotada pelo *marketing* e, que tem como objectivo, produzir produtos e serviços que atinjam ou superem os requisitos dos consumidores. O objectivo é atingido escutando a voz do consumidor, através das suas próprias opiniões, bem como, através da análise da posição competitiva da empresa relativamente à concorrência. O QFD pode ser

utilizado alternativamente para a concepção de novos produtos e para dirigir os esforços na melhoria dos produtos e processos. É nesta segunda vertente que o utilizaremos no estudo dos processos da **Tecnimaster** (ver Capítulo IV, p. 106)

O QFD combina os resultados do *benchmarking* com os métodos de uma matriz Causa e Efeito (C&E). Na sua forma mais simples, o QFD pode ser utilizado como uma matriz de inter-relações, cujas entradas são as expectativas ou desejos dos clientes e, as saídas, as especificações dos produtos ou serviços. O processo do QFD é uma interação entre as necessidades dos consumidores e as características do produto, temperada com uma análise competitiva e uma classificação da importância das diferentes necessidades dos clientes. O topo da matriz é utilizado para indicar a presença, se existirem, de interações entre as várias características de projecto do produto. Esta interação deve ser considerada quando se estabelecem as especificações finais do produto ou processo. O QFD pode, também, como atrás foi dito, ser utilizado para melhorar a qualidade de um produto ou processo e, é nessa função, que o utilizaremos neste trabalho.

2.9.3. As Cartas de Controlo

O desenvolvimento e uso da ferramenta estatística designada por Carta de Controlo, que serve para monitorizar e gerir uma grande variedade de processos, é da responsabilidade do Dr. Walter Shewhart (Shewhart, 1986). Este autor, durante a década de trinta do Século passado, identificou dois tipos de variação que eram comuns a todos os processos: a variação do tipo aleatório e a variação devida a causas assinaláveis. A variação nos processos tem dois tipos de causas: as causas comuns aleatórias (ruído), e as causas especiais. Qualquer processo que contenha outro tipo de variação que não a provocada por causas comuns é referido como estando fora de “controlo estatístico”. As cartas de controlo servem para determinar se o processo está em controlo estatístico, determinar os parâmetros de controlo normais e para identificar potenciais áreas de melhoria. Podem ser utilizadas para monitorizar variáveis de tipo contínuo, ou atributos, de natureza discreta. As variáveis de tipo contínuo, incluem valores quantificáveis ou mensuráveis que podem ser calculados ao longo de uma escala contínua, tais como médias, dimensões, peso, e temperatura. Os atributos não são inerentemente

quantificáveis, mas podem ser contados, tal como o número de artigos defeituosos, ou o número de defeitos por unidade inspeccionada.

O princípio estatístico subjacente às cartas de controlo é o **Teorema do Limite Central**. Este teorema refere que, mesmo para uma população com distribuição não normal, a distribuição das médias das amostras delas retiradas tem distribuição normal, centrada numa média θ , e, que, 99,73% dos valores recolhidos, estarão contidos dentro de três desvios padrões. Por meio deste teorema, pode-se construir uma carta de controlo que utiliza a média estatística como valor de referência, ou linha central da carta, e limites de controlo, distantes de 3 sigma da média estatística. Se um valor medido ficar fora dos limites superior ou inferior, pode-se concluir que este valor está num dos extremos da distribuição (só 0,27% dos valores estão nestas condições) e, o processo está, por consequência, fora de controlo. Adicionalmente, uma série de valores que estejam acima ou abaixo da linha de referência podem ser avaliados para determinar a estabilidade do processo.

O passo fundamental no estabelecimento duma carta de controlo é a determinação de um subgrupo racional. Ou seja, um subgrupo escolhido por razões de carácter técnico, no qual as variações internas ao grupo sejam atribuídas a causas não assinaláveis e, as variações entre grupos, sejam atribuíveis a causas especiais, cuja presença seja considerada possível e, cuja detecção, seja importante. O subgrupo deve ser constituído de forma a minimizar as variações internas ao próprio grupo. Esta concepção permite detectar se a variação entre subgrupos está a mudar, ao utilizar a variação entre grupos como referência da variação do processo. Se há alteração na dispersão dos dados, então, deve-se conceber a carta de controlo de forma a detectar rapidamente a variação do processo. Esta deve ser a filosofia subjacente à concepção duma carta de controlo, que se baseia na distribuição normal. Os limites e linha central podem, genericamente, ser obtidos das seguintes expressões:

$$UCL = \theta + k\sigma \quad (2.12)$$

$$CL = \theta \quad (2.13)$$

$$LCL = \theta - k\sigma \quad (2.14)$$

Nas fórmulas supra, o símbolo θ , representa qualquer parâmetro da população que interessa controlar. A tabela seguinte, indica os tipos de parâmetros que mais vulgarmente são controlados, na prática.

Categoria	Tipo	Utilização
Variáveis	\bar{x}	Controlo da localização do processo
	r	Controlo da dispersão processo
	s	Controlo da dispersão do processo
	x	Controlo da localização do processo
Atributos	p	Controlo da proporção de não conformes
	np	Controlo do número de não conformes
	c	Controlo do número de não conformidades
	u	Controlo do número de não conformidades por unidade

Tabela 2

A carta de controlo é um gráfico temporal da evolução do parâmetro θ . A equação $CL = \theta$, define a linha central da carta de controlo (CL) e, as equações 2.12 e 2.14, os limites superior e inferior de controlo, respectivamente. O valor da constante k é escolhido para que, quando o processo assinala uma condição fora de controlo, haja forte possibilidade de se detectar uma causa especial. O valor mais usual é $k = 3$, de tal forma que, a probabilidade da distribuição normal incluir todos os valores compreendidos entre $\pm 3\sigma$ (limites 3 Sigma), é de 99,73%. Isto significa que, há uma forte probabilidade de ocorrer uma causa especial no processo, quando um dos pontos da carta de controlo ocorre fora dos limites de controlo. De facto, existe apenas, a probabilidade de cerca de 3 em 1000, de que um ponto ocorra fora dos limites de controlo e não seja detectada uma causa especial (Messina, 1999). Um processo também pode não se encontrar em controlo estatístico se existirem conjuntos de pontos que exibam tendências ou ciclos de acordo com determinado padrão – ver regras definidas pela Western Electric (p. 43).

O histograma e a carta de controlo são ferramentas gráficas que permitem avaliar o resultado de um processo de produção. No caso do histograma, os dados representam um instantâneo do processo, enquanto, a carta de controlo é configurada para fornecer vários instantâneos fotográficos do processo, ao longo do tempo, com recurso à utilização de subgrupos de dados. É evidente que, para estudar o comportamento ao longo do tempo de um processo, a carta de controlo é um instrumento bastante mais útil.

As cartas de controlo costumam ser divididas em 3 zonas, que correspondem a unidades de desvio padrão, e são baseadas no desempenho actual dos processos que controlam. Por isso, **não há qualquer relação entre os limites de controlo do processo e os limites de especificação**. As cartas de controlo dão um registo cronológico ordenado do desempenho de um processo em tempo real e, permitem-nos distinguir, entre as causas normais e especiais, dizem aos operadores quando devem ajustar os processos, e dão-nos informação sobre a sua estabilidade. Porém, a utilização dos índices da capacidade do processo dá-nos a possibilidade de comparar o desempenho actual de um processo em relação aos limites de especificação estabelecidos pela engenharia de concepção (Dogdu,Santos, & Dougherty,1997).

De seguida, apresentam-se as principais cartas de controlo, nomeadamente:

2.9.3.1. Cartas de Controlo para Variáveis

As cartas de controlo para variáveis mais comuns são as da média (ver fig. 2.7, p. 42) e da amplitude. A carta da média é destinada a controlar a localização do processo, dando-nos informação acerca da tendência central dos dados e das medidas se acumularem numa distribuição normal à volta da média, ou \bar{x} . Embora esta estatística seja importante, é também crítico, conhecer a quantidade de variação à volta da média, ou seja, a sua dispersão. A verdadeira média do processo μ não é geralmente conhecida, mas, é estimada, através de amostras de dados, recolhidas do processo em estudo, ao longo de um período mais ou menos longo de tempo. Este período deve ter em linha de conta as causas de variação de longo prazo a que o processo está sujeito. Como regra prática, considera-se a extracção de dados da produção de um mês de um processo (Messina, 1999). Isto significa, geralmente, a constituição de 20 a 30 subgrupos de dados.

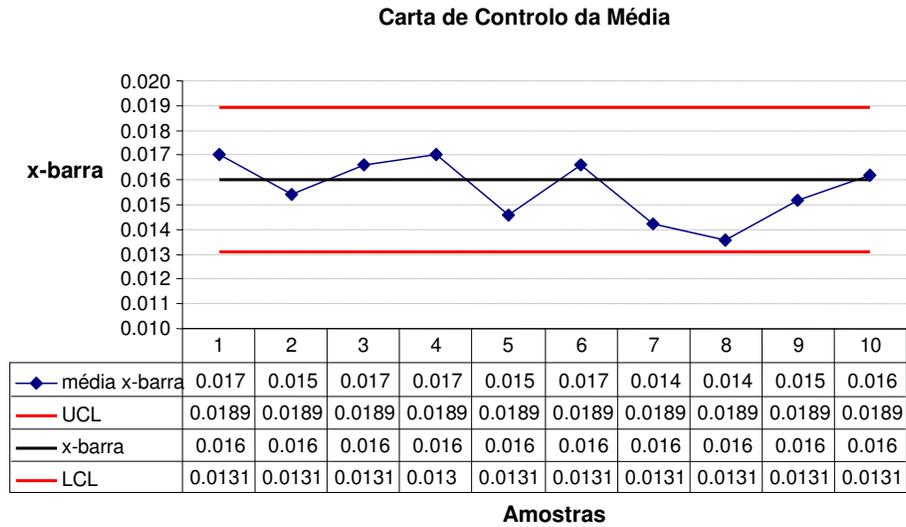


Figura 2.7 – Carta de Controlo da Média

Frequentemente, devido a razões de carácter económico, só há possibilidade de se recolherem amostras de pequena dimensão. Como em qualquer análise estatística, as amostras de grande dimensão são preferíveis, mas, no caso das cartas de controlo, não são imprescindíveis. Uma vez a carta construída, necessita ser avaliada, para se determinar se o processo se encontra em controlo estatístico. Em princípio, os pontos devem apenas exibir variação do tipo aleatório que não deve ser enquadrável num padrão identificável ou quantificável. Atendendo aos parâmetros de qualquer distribuição normal, e ao Teorema do Limite Central, aplicam-se os seguintes princípios:

1. 68% dos pontos devem encontrar-se a $\pm 1\sigma$ da linha central de referência.
2. 4,27 % dos pontos devem encontrar-se entre $\pm 2\sigma$ e $\pm 3\sigma$ da linha de referência central.
3. Não mais de 0,27% dos pontos devem exceder $\pm 3\sigma$ da linha central de referência.

Em adição à filosofia geral para avaliação duma carta de controlo, há uma série de regras de referência que foram definidas pela Western Electric, e que foram adoptadas quase universalmente. De acordo com estas regras, um processo não está em controlo estatístico, se (Smith, 2004; Grant & Leavenworth,1996):

1. Qualquer ponto sai fora dos limites de controlo ($\pm 3\sigma$).
2. Existem três pontos sucessivos acima da zona de 2σ a 3σ .
3. Quatro em cinco pontos sucessivos encontram-se na zona de 1σ a 2σ ou acima.
4. Oito pontos sucessivos encontram-se na zona de 1σ ou acima, num dos lados da linha central.
5. Tendências: uma série de pontos sem mudança apreciável, ou aleatória, de direcção; ou valores movendo-se continuamente, acima e abaixo, ou através da linha central, apresentando um padrão.
6. Ciclos: tendência de curta duração, nas quais os dados se podem repetir num padrão.
7. Mudanças: uma mudança súbita de nível numa ou noutra direcção.
8. Estratificação: um padrão de consistência anormal dentro duma única zona, ou perto da linha central.
9. Variáveis sistemáticas: um padrão previsível, aonde um ponto alto é sempre seguido por um ponto baixo, ou um ponto baixo por um ponto alto.

2.9.3.2. Cartas de Controlo para Atributos

A carta de controlo para atributos mais comum é, provavelmente, a carta p , que trata da proporção de artigos não conformes. Um artigo não conforme é aquele que não cumpre com as especificações. A proporção de artigos não conformes (p) é dada pelo quociente entre o número de artigos não conformes (x) e o número total de artigos (n) (equação 2.15):

$$p = \frac{x}{n} \quad (2.15)$$

Algumas vezes trata-se não a proporção de não conformes, mas o rendimento do processo (*yield*), que é dado por $1 - p$. A fracção de artigos não conformes está baseada na distribuição Binomial e, esta, considera n ensaios independentes, em que a hipótese de sucesso é constante para cada tentativa. No caso da proporção de não conformes a média do processo é definida como \bar{p} e, o desvio padrão, é dado por (equação 2.16):

$$\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} \quad (2.16)$$

Utilizando o modelo de Shewhart, definido pelas equações (2.12) a (2.14), vem:

$$UCL = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} \quad (2.17)$$

$$CL = \bar{p} \quad (2.18)$$

$$LCL = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} \quad (2.19)$$

Onde \bar{p} é a média da proporção de não conformes.

Quando o tamanho dos subgrupos ou amostras é constante, é possível construir uma carta de controlo alternativa à carta p , designada por carta np . Esta carta trata do número de artigos não conformes em vez da sua proporção. Em muitas situações esta métrica tem maior significado do que a proporção de artigos não conformes. Os parâmetros para a carta np , são dados pelas equações (Grant & Leavenworth, 1996):

$$UCL = n\bar{p} + 3\sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})} \quad (2.20)$$

$$CL = n\bar{p} \quad (2.21)$$

$$LCL = n\bar{p} - 3\sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})} \quad (2.22)$$

Sendo \bar{p} a média da proporção de não conformes.

Uma outra carta de controlo, a carta c , trata do número de não conformidades por unidade. Um artigo não conforme, ou defeituoso, pode ter um número variável de não conformidades. Esta carta de controlo baseia-se na distribuição de Poisson. Esta distribuição exige que, para um dado produto em análise, o número de oportunidades duma determinada ocorrência seja elevada e, que, a probabilidade de ocorrência duma não conformidade, em qualquer região do produto, seja pequena e constante. No modelo

de Poisson deve haver sempre a mesma área de oportunidade para a ocorrência das não conformidades.

As cartas de controlo têm sido o método tradicional de avaliar o desempenho dos processos produtivos ao longo do tempo e, de verificar, se os mesmos se encontram em controlo estatístico. A distribuição de Poisson é especialmente útil em operações complexas de produção, quando as oportunidades de aparecimento de defeitos crescem rapidamente e, a probabilidade de obter um defeito, numa área ou tempo específicos, é pequena. Devem-se utilizar as cartas de controlo baseadas na distribuição de Poisson quando a área de oportunidade ou os limites para encontrar defeitos são constantes (Messina, 1999; Henderson, 2006). É o caso de encontrar os defeitos numa placa de circuito impresso, ou contar os defeitos de soldadura num produto electrónico (Shina, 2002). A distribuição de Poisson implica a existência de ocorrências de acontecimentos ou defeitos num espaço, tempo ou região limitados. Não tem memória, ou seja, qualquer defeito que aconteça durante um intervalo é independente dos outros e, é proporcional, à duração do intervalo.

A vantagem da carta c é que permite controlar as não conformidades por unidade. A carta c monitoriza as variações do processo devidas às flutuações dos defeitos por artigo ou grupo de artigos. É útil na engenharia de processo porque permite saber quantos defeitos existem por artigo e, não apenas, quantos artigos são não conformes. Saber quantos defeitos existem num determinado componente produzido numa linha de fabrico, pode ser, nalguns casos, tão importante como determinar o número de componentes defeituosos (Bass, 2007). Aqui, é necessário distinguir a não conformidade do produto defeituoso, porque podem existir várias não conformidades num único artigo defeituoso. A probabilidade para que seja encontrada uma não conformidade num artigo segue a distribuição de Poisson. Se o tamanho da amostra não varia e, os defeitos nos artigos são fáceis de contar, a carta de controlo c é uma ferramenta eficaz para monitorizar a qualidade de um processo produtivo. Se \bar{c} for a média das não conformidades numa amostra, os limites de controlo serão dados, por (Grant & Leavenworth, 1996):

$$UCL = \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}} \quad (2.23)$$

$$CL = \bar{c} \quad (2.24)$$

$$LCL = \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}} \quad (2.25)$$

Com,

$$\bar{c} = \frac{c_1 + c_2 + \dots + c_k}{k}$$

Uma alternativa à carta c, é a carta u, que é utilizada quando o número de unidades a tratar por subgrupo não é constante.

Há ainda uma multiplicidade de cartas de controlo que podem ser utilizadas noutras situações específicas. No entanto, considera-se que as descritas são as mais utilizadas e, num trabalho como este, não faria sentido estar a descrevê-las em pormenor, podendo mais informações sobre as mesmas ser obtidas, por exemplo, nos livros de Grant & Leavenworth (1996) e Smith (2004), entre outros.

2.9.4. O Diagrama de Causa e Efeito

O Diagrama de Causa e Efeito, também designado por diagrama de espinha de peixe ou diagrama de Ishikawa, deve o seu nome ao Dr. Kaoru Ishikawa. Este diagrama baseia-se no facto de que qualquer processo pode ser dividido em categorias principais (causas), normalmente em número de quatro, mas podendo ser mais, que têm impacto na categoria (efeito) de interesse que é necessário analisar (Ishikawa, 2002).

As quatro categorias tradicionais que se costumam incluir neste diagrama, são: mão-de-obra, máquinas, materiais e métodos. Designam-se, habitualmente, pelos 4 M. Contudo, em muitas aplicações destes diagramas à análise SMT¹⁵, a mão-de-obra necessita ser substituída por qualquer outra causa, uma vez que, grande parte das máquinas existentes na linha de fabrico é totalmente automatizada.

¹⁵ *Surface Mount Technology*

Os técnicos que estão mais familiarizados com as características de interesse são os responsáveis habituais pela construção deste tipo de diagramas. São gerados geralmente após a realização de sessões de *brainstorming*. Os diagramas de causa e efeito são úteis para compreender quais são as variáveis que afectam as características de interesse do processo em estudo e, o potencial desta ferramenta, reside na representação gráfica dessas características, como se verá posteriormente, quando se apresentarem os resultados deste trabalho (ver Capítulo IV, fig. 4.8).

O método de aquisição de conhecimento acerca de um processo funciona por iteração. Os diagramas de causa e efeito são utilizados, na prática, no Desenho de Experiências (DOE), no controlo de processos e no treino do pessoal. O desenho de experiências é uma ferramenta útil para a análise e optimização das variáveis que afectam os processos, mas é necessário saber quais os factores que devem ser incluídos. O diagrama é uma boa ferramenta para decidir quais os factores a incluir nessas experiências. É valioso, na medida em que, nos fornece uma visão de todos os possíveis factores que podem ser incluídos. Também, quando uma carta de controlo assinala que um processo saiu fora do controlo estatístico o diagrama de causa e efeito é útil. Assinala todas as possíveis acções que podem colocar o processo fora de controlo e, as correspondentes acções correctivas apropriadas, necessárias para remover a causa primária.

2.9.5. A Concepção de Experiências

O designado DOE – *Design of Experiments* é uma estratégia de pesquisa que foi introduzida inicialmente por Sir Ronald Fisher, um estatístico britânico, nos anos vinte do Século passado. A técnica começou por ser utilizada na pesquisa agrícola e, demonstrou, que se podiam conduzir experiências válidas em ambientes constituídos por múltiplas variáveis naturais sujeitas a flutuações, tais como a temperatura, condições e humidade do solo (Jiju, 2003). Os princípios então desenvolvidos, foram adoptados, com sucesso, a aplicações industriais e militares e, na década de oitenta do Século XX, o DOE ganhou aceitação como ferramenta essencial para a melhoria dos produtos e processos. Na gestão da qualidade, o DOE é utilizado para determinar quais

as entradas dos processos que têm impacto significativo na saída e, quais os níveis, que as variáveis que condicionam o processo (factores) devem possuir, para se obter uma resposta (saída do processo) desejada (ver fig. 2.4, p. 28).

No contexto do Seis Sigma, a actividade de DOE ocorre, geralmente, durante as fases de *Analyze* e *Improve* do ciclo DMAIC. O DOE é um processo como qualquer outro e, deve ser conduzido por fases, a primeira das quais, é a de estabelecer um objectivo de melhoria e, se possível, quantificá-lo. A seguir, é necessário identificar as maiores fontes de variação; esta fase é tipicamente realizada com recurso a actividades de *brainstorming*, utilizando diagramas de causa e efeito, ou ferramentas de cariz mais estatístico, tais como os gráficos de Pareto e a análise de variância (ANOVA). Porque não é económico, nem prático, conduzir uma experiência de DOE utilizando todos os factores identificados, será necessário ordená-los, dar prioridade aos mais importantes e, seleccioná-los, de forma organizada.

A informação recolhida a partir duma experiência pode ser utilizada para aumentar o desempenho funcional de um produto, reduzir o número de defeitos, ou o tempo de ciclo de produção, ou para reduzir a variação excessiva de um processo. O DOE permite determinar quais os factores controláveis que afectam determinadas características da qualidade e, quais os melhores níveis desses factores.

A concepção de experiências com suporte estatístico envolve, geralmente, a alteração de duas ou mais variáveis em simultâneo, obtendo, de seguida, um conjunto de resultados nas mesmas condições experimentais (Pereira & Requeijo, 2008). Um dos métodos tradicionais de experimentação consiste em avaliar apenas uma variável (factor) de cada vez, mantendo constantes todas as outras. Este tipo de experiência demonstra o efeito da variável escolhida sobre o processo, enquanto se mantêm todas as outras variáveis constantes. Este tipo de ensaio sofre, no entanto, de um certo número de problemas:

- Geralmente, não é possível fixar todas as outras variáveis.
- Não há forma de determinar o efeito da variação conjunta (interacção) das variáveis independentes.

A vantagem da utilização do método estatístico pode ser verificada a partir dos seguintes pontos:

- As interacções entre as variáveis de entrada podem ser medidas.

- O erro experimental é passível de ser quantificado e, pode ser utilizado, para estimar o intervalo de confiança que o investigador quer adoptar.

O projecto de uma experiência consiste em controlar as variáveis independentes de um processo (factores) que se acredita terem efeito no resultado de uma experiência de forma controlada e pré-determinada. Os dados recolhidos durante a experiência podem ser analisados estatisticamente para se determinar o efeito das variáveis independentes ou das suas combinações. Deve também ser previsto um dispositivo para lidar com as variáveis espúrias, ou seja, variáveis não explicitamente identificadas com os factores em análise (Lisboa & Gomes, 2006). Estas variáveis representam o ruído do processo, podem mascarar o efeito das variáveis primárias e devem ser anuladas ou bloqueadas.

2.9.5.1. Conceitos e Metodologia

Na metodologia do DOE há alguns conceitos e termos que interessa explicitar. Entende-se por **experiência** ou **ensaio**, um teste, no qual se efectua, propositadamente, alterações de certas variáveis ou parâmetros (os factores) que afectam o processo em estudo, para observar as mudanças que ocorrem, numa ou mais características do processo e, conseguir identificar, as respectivas causas. Os **factores** podem ser controláveis, ou não. Os valores que o factor assume, ou os atributos de factores qualitativos, designam-se por **níveis**. Um **tratamento** é uma combinação distinta de níveis e factores.

O **efeito** de um factor é a alteração média observada na **resposta** do processo quando qualquer factor muda de nível. Designa-se por **resposta**, a variável em investigação, também chamada variável dependente, resultado de uma experiência, ou seja, a característica da qualidade de um produto que o investigador está interessado em otimizar (ver equação 2.26). Pode haver efeitos de **interacções** na variável de resposta provocada pela combinação de duas ou mais variáveis de entrada. Os planeamentos experimentais podem envolver um ou mais factores controláveis. Neste último caso, designa-se por **combinação de tratamentos**, ou de **níveis**, o conjunto de níveis de todos os factores de uma determinada experiência.

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.26)$$

Dois outros conceitos fundamentais do DOE são a replicação e a aleatorização das experiências. A **replicação** é a repetição de uma experiência ou ensaio sob condições análogas. As **réplicas** são os valores obtidos por repetição de uma experiência. A replicação é importante, porque permite obter uma estimativa do erro experimental e uma estimativa mais eficiente dos efeitos dos factores. Por outro lado, a condução das experiências deve ser efectuada de forma perfeitamente aleatória para garantir que as observações obtidas são variáveis aleatórias independentes (Pereira & Requeijo 2008).

2.9.5.2. Experiências Elementares

- **Comparação Simples**

Utiliza-se para comparar duas ou mais médias, variâncias ou probabilidades. É necessário considerar o tamanho da amostra, o tipo de distribuição e a estrutura da hipótese estatística (mono ou bi-caudal).

- **Experiências de um único Factor e Níveis Múltiplos**

A análise de “um factor de cada vez” não é eficiente. Considere-se, por exemplo, uma única variável ou factor, com cinco níveis. Uma comparação dois a dois, requer 10 tentativas - $\binom{5}{2}$. Se, cada comparação, tiver um nível de significância (α) de 0,05 então, a probabilidade de se fazer uma avaliação correcta, é de $(1-\alpha)^{10} = 0,60$. A técnica privilegiada utilizada neste tipo de experiência é a ANOVA. O teste de hipóteses verifica se $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n$. O pressuposto de partida, é o de que, o erro tem distribuição normal - $N \sim (0, \sigma^2)$. É necessário efectuar o teste de resíduos para verificar se as condições de teste são devidamente aleatorizadas, e que, os resultados e os erros, são independentes. Caso estas condições não sejam verificadas, pode-se recorrer a testes não paramétricos (e.g., Kruskal -Wallis).

Considere-se agora, um processo que tem 10 variáveis para ser testadas, cada uma com 3 níveis. De um ponto de vista matemático, isto significa $3^{10} = 59049$ tentativas, o que é tremendamente ineficiente. Para resolver esta questão, utilizam-se as experiências designadas por *screening*, destinadas a reduzir o número de combinações a valores

razoáveis, que permitam o seu tratamento acessível. Uma das técnicas mais utilizadas é a realização de experiências factoriais fraccionadas. Tem esta designação, porque usa apenas algumas das combinações possíveis dos factores e, utiliza, propriedades das matrizes ortogonais para o efeito.

É claro que, há um compromisso decorrente da utilização desta técnica. Em muitos casos, o propósito das experiências factoriais fraccionadas é determinar quais são as variáveis importantes e, quais, as que, não o são. E, neste caso, não é muitas vezes possível determinar, com precisão, quais as interacções presentes e quais os seus efeitos na resposta. Por outro lado, algumas das interacções são sobrepostas e, não permitem, a determinação dos seus efeitos de forma individualizada.

2.9.5.3. Experiências de Tipo Factorial

Método Factorial Completo – trata-se de experiências, nas quais, para cada tentativa ou réplica, são investigadas todas as combinações possíveis dos níveis dos diferentes factores. Todos os factores a testar são combinados, sem excepção. Desta forma, é possível investigar todas as combinações possíveis de interacções para determinar a mais favorável. Por exemplo, para três factores, com dois níveis por factor, necessitaremos de $2^3 = 8$ ensaios.

O planeamento 2^k é particularmente útil nas fases iniciais de um trabalho experimental para se proceder à determinação de quais os factores de interesse para o mesmo. Porque só existem dois níveis para cada factor, pode-se admitir que a resposta seja aproximadamente linear para a gama dos níveis dos factores escolhidos. O tipo mais simples de experiência é a 2^2 , ou seja, dois factores, A e B, cada um com dois níveis. Esta experiência pode ser representada geometricamente no plano, como um quadrado, com $2^2 = 4$ ensaios ou combinações de tratamentos (ver fig. 2.8, p. 55). Neste tipo de experiências, é comum representar os níveis alto e baixo dos factores A e B pelos sinais -1 e $+1$, respectivamente. Em geral, uma combinação de tratamentos é representada por uma série de letras maiúsculas. Os efeitos de interesse no planeamento 2^2 são os efeitos principais A e B e o factor de interacção de segunda ordem AB. As observações desta experiência são representadas por (1), a, b, e ab e, é possível, estimar

os efeitos destes factores. O valor estimado provocado pelo factor A na resposta y será dado por (valor médio de y @ a₁) - (valor médio de y @ a₀), que pode ser expresso por:

$$A = \bar{y}(a_1) - \bar{y}(a_0) \quad (2.27)$$

As experiências factoriais, nas quais todos os factores de interesse têm somente dois níveis são de importância particular para a fase *Improve* do Seis Sigma (Henderson, 2006). Numa experiência factorial total, todas as combinações possíveis dos factores são testadas. Por exemplo, numa experiência $2^3 = 8$ existem as seguintes combinações de factores: A⁺B⁺C⁺; A⁻B⁺C⁺; A⁺B⁻C⁺; A⁺B⁺C⁻; A⁻B⁻C⁺; A⁻B⁺C⁻; A⁺B⁻C⁻; A⁻B⁻C⁻, sendo A, B e C os factores, e os sinais + e - os níveis altos e baixos, respectivamente, de cada factor. Os efeitos avaliados são decorrentes dos factores principais A, B e C, das interacções de segunda ordem, ou seja, do efeito conjugado de um par de factores AB, AC e AD, e da interacção de terceira ordem ABC. Em geral, uma experiência do tipo 2^k avalia todos os efeitos decorrentes dos factores 1,2, ..., k-1. Relativamente às experiências OFAT (*one factor at a time*) as experiências do tipo factorial são mais eficientes em termos de recursos, tempo, tamanho da amostra e lidam com as interacções entre factores. Além disso, permitem avaliar uma variada gama de condições experimentais.

Nas interacções entre factores investigam-se situações em que estão presentes os efeitos provenientes da conjugação de vários factores, ou seja, o valor da variável de resposta do processo não depende somente duma função do tipo

$$Y(\text{resposta}) = \sum_i f_i(\text{factor } i) \quad (2.28)$$

Mas sim, está dependente duma função do tipo

$$Y(\text{resposta}) = f(\text{factor}_1, \dots, \text{factor}_n) \quad (2.29)$$

Representação dos Efeitos

No caso de experiências com factores de dois níveis, pode-se codificar o domínio de cada factor como {-1,1}.

Considerem-se dois factores, A e B; o domínio de A é {1,2} com o subscrito i e o domínio de B é {1,2} com o subscrito j. Podem-se utilizar outros subscritos para designar a réplica ou repetição do ensaio. Foram executadas r repetições, representadas pelo subscrito k com o domínio {1, ..., r}.

As respostas são representadas por y_{ijk} . Para representar a média de um ou mais subscritos, podemos representar o subscrito respectivo por um asterisco. Para $n = 2$ (dois níveis):

$$\bar{y}_{***} = \frac{1}{n} \sum_i \sum_j \sum_k y_{ijk} \quad (2.30) \qquad \bar{y}_{ij*} = \frac{1}{r} \sum_k y_{ijk} \quad (2.31)$$

$$\bar{y}_{i*k} = \frac{1}{2} \sum_j y_{ijk} \quad (2.32) \qquad \bar{y}_{2**} = \frac{1}{2} \sum_j \sum_k y_{2jk} \quad (2.33)$$

Efeitos				
A	B	AB	Resposta Média	
-1	-1	+1	\bar{y}_{11*}	(1)
-1	+1	-1	\bar{y}_{12*}	b
+1	-1	-1	\bar{y}_{21*}	a
+1	+1	+1	\bar{y}_{22*}	ab
M (A)	M (B)	I (AB)		

Tabela 3 - Contrastes

A coluna AB é o produto de A e B.

- Efeito Principal para o Factor A e B (2 factores, 2 níveis para cada factor) – equações (2.34; 2.35):

$$M(A) = \bar{y}_{2**} - \bar{y}_{1**} = \frac{-\bar{y}_{11*} - \bar{y}_{12*} + \bar{y}_{21*} + \bar{y}_{22*}}{2} = \frac{(\bar{y}_{21*} + \bar{y}_{22*}) - (\bar{y}_{11*} + \bar{y}_{12*})}{2} \quad (2.34)$$

$$M(B) = \frac{-\bar{y}_{11*} + \bar{y}_{12*} - \bar{y}_{21*} + \bar{y}_{22*}}{2} \quad (2.35)$$

- Interação entre dois factores A e B – equação (2.36):

$$I(AB) = \frac{-\bar{y}_{22*} + \bar{y}_{11*}}{2} - \frac{\bar{y}_{21*} + \bar{y}_{12*}}{2} = \frac{\bar{y}_{22*} + \bar{y}_{11*} - \bar{y}_{21*} - \bar{y}_{12*}}{2} \quad (2.36)$$

Com base nas expressões anteriores, é relativamente fácil calcular os efeitos dos factores efectuando as respectivas somas. O algoritmo para calcular os efeitos de factores com dois níveis é o seguinte:

- Calcular a representação dos efeitos para cada efeito principal e para cada interacção.
- Calcular a combinação linear das respostas, utilizando os sinais da coluna dos efeitos para cada efeito principal e para cada interacção (contrastes) - ver tabela 3.
- Dividir os resultados por 2^{k-1} em que k é o número total de factores.

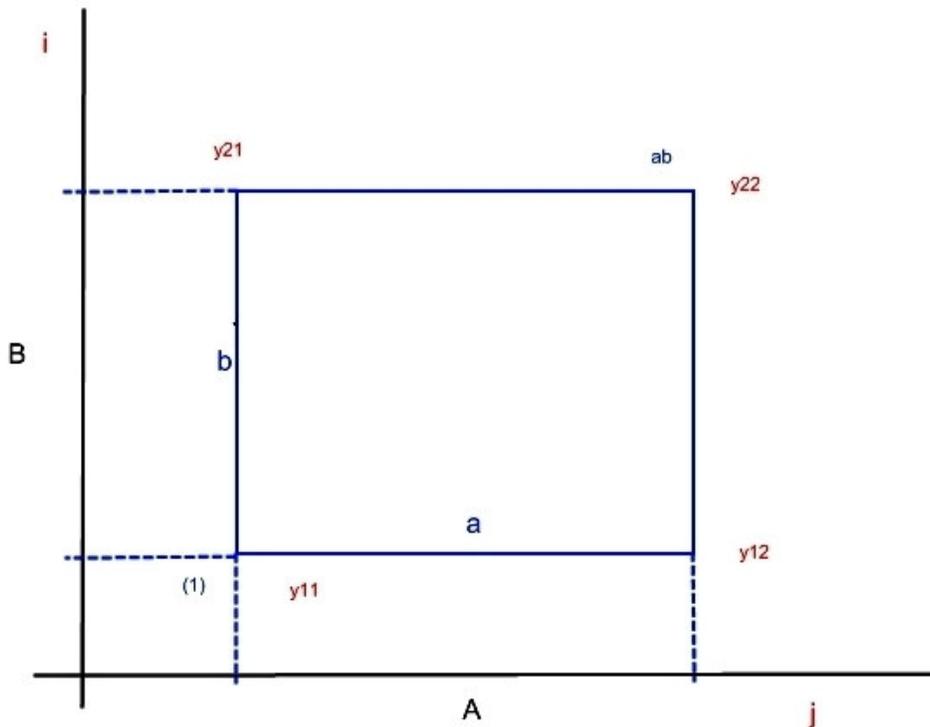


Figura 2. 8 – Experiência Factorial com 2 Factores

De seguida, podem-se comparar os efeitos calculados para cada interacção com o erro padrão. Se o efeito é muito maior do que este (e.g., mais do dobro) pode ser considerado significativo. O erro padrão pode ser calculado como $\frac{2 * \hat{s}}{\sqrt{n}}$, sendo \hat{s} a estimativa do desvio padrão do erro experimental não controlado e, n, o número total de tentativas de ensaio (incluindo repetições). Para factores com mais de dois níveis por factor o processamento complica-se bastante, mas o princípio de cálculo permanece o mesmo. Actualmente, as aplicações de *software* estatístico existentes, entre as quais se destaca o MINITAB, utilizado no presente trabalho, facilitam bastante a vida ao investigador ou ao técnico que pretenda efectuar experiências.

Método Factorial Fraccionado – À medida que o número de factores aumenta numa experiência 2^k o número de ensaios necessários aumenta rapidamente. Muitas vezes, há pouco interesse nas interacções de ordem alta, especialmente, quando se começa a

estudar um processo ou sistema. Se, se pode considerar que certas interacções de ordem elevada podem ser desprezadas, podemos utilizar uma experiência factorial fraccionada que envolve menor número de ensaios do que um conjunto completo de 2^k corridas. As experiências factoriais fraccionadas têm um papel importante nas experiências de selecção e triagem (*screening experiments*). Estas experiências de carácter exploratório têm por finalidade identificar quais os factores, se existirem, que têm efeitos significativos. São utilizadas geralmente nas fases iniciais de um projecto de melhoria quando se pretende eliminar os factores que não têm efeitos significativos na resposta. Os factores que forem identificados como importantes serão então investigados em experiências posteriores de optimização. No presente trabalho, utilizou-se uma experiência factorial fraccionada na fase de melhoria do projecto levado a efeito na **Tecnimaster** (ver fig. 4.10 e 4.12, pp. 115,117).

Qualquer meia fracção duma experiência 2^k contém 2^{k-1} ensaios, sendo normalmente designada por factorial fraccionária 2^{k-1} . Considere-se, por exemplo, uma experiência 2^{3-1} . Esta experiência requer apenas quatro ensaios, em contraste com a experiência completa, que requer oito ensaios. Seleccionem-se quatro combinações de tratamento a, b, c e abc como meia fracção (ver tabela 4, p. 57). A experiência é seleccionada utilizando as combinações de tratamentos que resultam em sinal positivo para o efeito ABC. Esta combinação designa-se por **gerador** desta experiência particular. Como o elemento identidade I tem também o sinal mais para os quatro ensaios, tem-se $I = ABC$, que é designada por relação de definição para a experiência. Da metade superior da tabela 4 obtêm-se as estimativas dos efeitos principais como combinações lineares das diferentes observações (equação 2.37):

$$A = \frac{1}{2}(a - b - c + abc); B = \frac{1}{2}(-a + b - c + abc); C = \frac{1}{2}(-a - b + c + abc) \quad (2.37)$$

Efeitos dos Factores								
	I	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
a	+	+	-	-	-	-	+	+
b	+	-	+	-	-	+	-	+
c	+	-	-	+	+	-	-	+
abc	+	+	+	+	+	+	+	+
ab	+	+	+	-	+	-	-	-
ac	+	+	-	+	-	+	-	-
bc	+	-	+	+	-	-	+	-
(1)	+	-	-	-	+	+	+	-

Tabela 4

As estimativas das interacções de segunda ordem são as seguintes combinações lineares (equações 2.38):

$$BC = \frac{1}{2}(a - b - c + abc); \quad AC = \frac{1}{2}(-a + b - c + abc);$$

$$AB = \frac{1}{2}(-a - b + c + abc) \quad (2.38)$$

Como se pode verificar, as combinações lineares das observações do factor A são iguais às combinações da interacção BC. Ou seja, a combinação linear da coluna A confunde-se com a combinação da coluna BC (*alias*). De forma similar, B = AC e C = AB. Na nossa experiência 2^{3-1} esta associação de pares combinados é a consequência directa da replicação fraccionada. Em muitas situações práticas, é possível seleccionar a fracção de modo a que, os efeitos principais e as interacções de ordem baixa com interesse, estejam associados, apenas, com interacções de ordem alta, que, na maior parte dos casos, podem ser negligenciadas. A estrutura associada a esta experiência é encontrada a partir da relação de definição $I = ABC$, multiplicando-a por qualquer dos efeitos. Ou seja, o par associado a A é $A * ABC = A^2BC = BC$, uma vez que, $A^2 = 1$. Da mesma forma, os pares associados a B e a C, são:

$$B = B * ABC = AB^2C = AC \quad \text{e} \quad C = C * ABC = ABC^2 = AB$$

Se a escolha tivesse recaído sobre a outra meia fracção, isto é, sobre as combinações de tratamentos da tabela associadas ao sinal menos de ABC, ter-se-ia:

$$\text{Gerador I} = -ABC$$

Pares associados $A = -BC$; $B = -AC$ e $C = -AB$

Assim, na realidade, as estimativas de A, B e C que resultam dessa fracção estimam realmente os pares $A - BC$, $B - AC$ e $C - AB$. Na prática, não interessa qual a meia fracção seleccionada. A fracção com sinal mais na relação de definição é designada geralmente por fracção principal e, a outra fracção, por fracção alternativa. Escolhendo AB como gerador para a experiência fraccionada, ter-se-ia $A = A * AB = B$ e os dois efeitos principais A e B estariam associados perdendo-se informação importante.

Um conceito importante a explicitar tem a ver com a **resolução** de uma experiência. Trata-se de uma forma útil de classificar as experiências factoriais fraccionárias de acordo com o padrão de associação que produzem. As experiências de resolução III, IV e V são particularmente importantes. Quando maior for a resolução da experiência tanto maior é o potencial para uma identificação sem ambiguidade dos efeitos e interacções mais importantes. As experiências de resolução III, são muitas vezes usadas para triagens (*screening experiments*), efectuadas com a finalidade de identificar os factores potencialmente importantes num conjunto de factores identificados como merecendo ser investigados. Para muitas situações práticas, uma experiência de resolução V é excelente e a resolução IV pode ser adequada (Henderson, 2006). Em resumo:

Resolução III	Nenhum efeito principal é confundido com outro efeito principal, mas os efeitos principais são confundidos com interacções de segunda ordem e as interacções de segunda ordem são confundidas entre si. Só se podem fazer estimativas plausíveis dos efeitos dos factores principais se for razoável supor que os efeitos das interacções de segunda ordem são relativamente pequenos.
Resolução IV	Nenhum efeito principal é confundido com qualquer outro efeito principal, mas as interacções de segunda ordem são confundidas entre si. Pode-se detectar a presença das interacções de segunda ordem, mas não se podem identificar de forma inequívoca.
Resolução V	Nenhum efeito principal ou interacções de segunda ordem são confundidas com qualquer outro factor principal ou interacções de segunda ordem, mas as interacções de segunda ordem são confundidas com interacções de terceira ordem.

2.9.5.3.1. Análise Estatística

Existem vários métodos para determinar que efeitos são significativamente diferentes de zero. No primeiro, a magnitude de um efeito é comparada com a estimativa do seu erro padrão. No segundo método, utiliza-se um modelo de regressão e, cada efeito, está associado a um coeficiente de regressão. Finalmente, podem-se usar gráficos de probabilidade normal. Normalmente, o método utilizado está dependente do tipo de programa informático utilizado para a análise (Henderson, 2006).

A magnitude dos efeitos pode ser avaliada através da comparação de cada efeito com o seu erro padrão. Numa experiência de 2^k , com r réplicas, há um total de $N = r2^k$ ensaios. Uma estimativa do efeito pode ser calculada através da diferença de duas médias e, cada média, é calculada a partir de metade das medidas. A variância da estimativa do efeito será, portanto (equação 2.39):

$$\sigma_{\text{Efeito}}^2 = \frac{\sigma^2}{N/2} + \frac{\sigma^2}{N/2} = \frac{2\sigma^2}{N/2} = \frac{\sigma^2}{r2^{k-2}} \quad (2.39)$$

O erro padrão estimado do efeito obtém-se, substituindo na equação supra σ^2 pelo seu estimador $\hat{\sigma}^2$ e extraíndo a raiz quadrada. Se houver r réplicas em cada dos 2^k ensaios da experiência e, se $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}$, representarem os resultados dos efeitos na i -ésima corrida, então a estimativa da variância do i -ésimo ensaio, será (equação 2.40):

$$\hat{\sigma}_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{(n_i - 1)} \quad (2.40) \quad \text{Com } i = 1, 2, \dots, 2^k$$

Se calcularmos a média das estimativas das 2^k variâncias teremos a estimativa global, (equação 2.41):

$$\hat{\sigma}_i^2 = \sum_{i=1}^{2^k} \frac{\hat{\sigma}_i^2}{2^k} \quad (2.41)$$

Cada $\hat{\sigma}_i^2$ está associado a $n - 1$ graus de liberdade e, portanto, $\hat{\sigma}^2$ está associado a $2^k (n - 1)$ graus de liberdade.

Em qualquer experiência, é útil termos um modelo de previsão das respostas. Há uma relação forte entre uma experiência de DOE e uma análise de regressão e, esta característica, pode ser utilizada para se calcularem as previsões de uma experiência factorial 2^k . Ao ajustarmos um modelo estatístico aos dados, é usual escrever-se, que:

Valores dos dados observados = Valores previstos pelo modelo + Resíduos

Uma experiência de dois factores, sem interacções, pode ser descrita pela seguinte expressão (Henderson, 2006):

Valores dos dados observados = Média geral + Efeitos dos Factores nas Colunas + Efeitos dos Factores das Filas + Erro Aleatório ou, mais sucintamente (equação 2.42),

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (2.42) \quad \text{com } i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b; k = 1, 2, \dots, r$$

$$e, \sum_{i=1}^a \alpha_i = 0; \quad \sum_{j=1}^b \beta_j = 0; \quad \varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2);$$

No caso de haver interacção, pode-se considerar que (equação 2.43),

Valores dos dados observados = Média Geral + Efeitos dos Factores das Colunas + Efeitos dos Factores das Filas + Efeitos das Interacções + Erro Aleatório

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.43), \quad \text{com } i = 1, 2, \dots, a; j = 1, 2, \dots, b; k = 1, 2, \dots, r$$

r

$$\sum_{i=1}^a \alpha_i = 0, \quad \sum_{j=1}^b \beta_j = 0, \quad \sum_{j=1}^b (\alpha\beta)_{ij} = 0, \quad \sum_{i=1}^a (\alpha\beta)_{ij} = 0, \quad \varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$$

O número de níveis dos factores das filas é a, o número de níveis dos factores das colunas é b, e o número de réplicas é r.

2.10. O Seis Sigma nas Pequenas Empresas

2.10.1. Alguns Mitos acerca do Seis Sigma

O Seis Sigma, como já se referiu, é uma iniciativa da qualidade focada na melhoria dos processos (Loon Ching Tang, 2007). Trata-se duma metodologia de resolução de problemas que reduz custos e aumenta a satisfação do consumidor, ao provocar reduções de desperdício, em todos os processos envolvidos na criação ou entrega de produtos ou serviços. Mais especificamente, o Seis Sigma, é uma técnica de resolução de problemas que utiliza dados, medidas e técnicas estatísticas para identificar quais os factores vitais (*vital few*) que reduzirão, de forma dramática, o desperdício e os defeitos, enquanto faz aumentar a previsão dos resultados, a satisfação dos consumidores, o lucro e o valor para os accionistas (Brue, 2006).

O Seis Sigma trata de factos, de dados, e não se baseia em suposições, sentimentos ou convicções acerca da solução para um determinado problema. Há três conceitos básicos que são comuns a todos os negócios, quaisquer que eles sejam, e que o Seis Sigma trata: processos, defeitos e variação. Um processo é qualquer conjunto de tarefas repetitivas que produzem um determinado resultado. Em todos as actividades e funções nucleares das empresas existem processos. A sua compreensão, e fazê-los trabalhar ao mais alto nível de desempenho possível, é o objectivo principal do Seis Sigma.

Parte da metodologia Seis Sigma consiste em medir um processo em termos de defeitos. O Seis Sigma ajuda a eliminar estes defeitos, de tal forma que, a empresa possa, de forma consistente, produzir produtos e serviços que vão de encontro, ou excedam, as expectativas dos clientes. É um mito corrente que o Seis Sigma é uma metodologia que só se aplica a grandes empresas e organizações (Brue, 2006). No entanto, a General Electric, que é tida como uma das empresas com maior sucesso na aplicação do Seis Sigma, tratou as suas divisões de negócios como se fossem pequenas unidades integradas no conjunto do grupo (Brue, 2006).

Cerca de dez por cento das receitas duma pequena empresa são desperdiçadas em defeitos existentes nos processos. Podemos considerar defeito uma característica mensurável dum processo, ou da sua saída, que não se encontra dentro dos limites

aceites pelos consumidores, ou seja, não se encontra dentro das especificações. O nível sigma de um processo é calculado em termos do número de defeitos em relação ao número de oportunidades para a ocorrência desses mesmos defeitos.

A metodologia Seis Sigma também se destina a reduzir variações nos processos de negócio. Parece óbvio, mas não se consegue produzir um produto ou serviço de alta qualidade, se existirem variações no processo de fabrico ou na distribuição. Podemos considerar a variação como sendo qualquer diferença quantificável entre uma especificação de medida, ou padrão, e o desvio em relação a essa medida ou padrão, na saída de um processo. Basicamente, atinge-se um valor de Seis Sigma quando os nossos processos produzem apenas 3,4 defeitos por milhão de oportunidades (DPMO). Por outras palavras, os processos estão a trabalhar de uma forma quase perfeita.

A maioria das empresas trabalha com níveis de qualidade de três a quatro sigmas, o que se traduz em desperdícios de cerca de vinte e cinco por cento das suas receitas, devido a defeitos nos seus processos produtivos (Brue, 2006). Nem todos os processos necessitam de trabalhar com níveis Seis Sigma e, o nível sigma alvo, depende da importância estratégica do processo, e do custo da melhoria face ao benefício colhido (Linderman, 2005).

O Seis Sigma trata da resolução de problemas e, os problemas existem, qualquer que seja a dimensão das empresas. No entanto, há alguns mitos acerca do Seis Sigma que convém referir:

- Aplica-se apenas a grandes empresas.
- Produz resultados só em contexto de unidades produtivas. Embora seja verdade que o Seis Sigma se originou em ambientes produtivos, tem sido aplicado com êxito em todo o tipo de actividades de negócio: financeiras, saúde, militares, cadeias alimentares, linhas aéreas, cadeias de hotéis, armazéns de géneros, etc.
- É necessário contratar um consultor externo.
- São necessários peritos para que o método funcione.
- A Seis Sigma é uma metodologia estatística complicada, inacessível ao colaborador comum.

- O Seis Sigma não incorpora os requisitos do cliente. Isto é totalmente falso. Todo o projecto Seis Sigma começa com os consumidores, determinando quais os factores que são críticos para estes.
- O Seis Sigma é um assunto para economistas, sem ganhos reais.
- O Seis Sigma é apenas formação.
- O Seis Sigma é uma receita mágica para resolver problemas com pouco esforço. (Brue, 2006).

Como é evidente, os pontos acima referidos não são inteiramente verdadeiros e, correspondem a ideias preconcebidas, sem qualquer base científica. No entanto, a mudança provoca receio. Contudo, se uma empresa se sente confortável ao fazer as mesmas coisas todos os dias, significa que cometerá os mesmos erros repetidamente e, se não houver a intenção de mudar algumas das actividades e, a forma como as desempenhamos, não haverá melhorias no negócio. O sentimento de que as coisas poderiam eventualmente melhorar, mas que se encontram a funcionar, também pode inibir a mudança. O negócio pode correr bem, mas pode sempre melhorar, tornando os clientes mais satisfeitos e aumentando os lucros. O sentimento de que os custos podem aumentar também pode impedir que se implemente um programa de melhoria Seis Sigma. Mas, um programa correctamente implementado não faz aumentar os custos, mas sim, diminui-los. O receio da perda de tempo sem obtenção de resultados também é um sentimento que acompanha alguns gestores quando se pretende instituir um novo programa. Na génese deste sentimento, está a consciência de algumas experiências anteriores mal sucedidas.

As duas últimas décadas testemunharam um aumento de pressão por parte dos consumidores para obter maior valor nas suas aquisições, quer este seja obtido a partir de um aumento de qualidade, entregas mais rápidas, ou diminuição de custos, ou através de qualquer combinação destes factores (Kumar, 2006). Este estado de coisas encorajou muitas indústrias a adoptar o Seis Sigma (como metodologia de melhoria de processos e abordagem de resolução de problemas) ou o *Lean Manufacturing* (para melhorar a rapidez de resposta às necessidades dos consumidores e reduzir os custos) como parte de uma estratégia de aumento de quota de mercado e de maximização dos lucros. Todas as grandes empresas como a Toyota, General Electric, Motorola, Honeywell, Samsung,

Texas Instruments e muitas outras, obtiveram resultados dramáticos por adotarem o Seis Sigma ou o *Lean Manufacturing* nas suas organizações (Kumar, 2006; Basu, 2004).

No caso de uma pequena empresa como a **Tecnimaster**, julga-se perfeitamente possível adequar um projecto Seis Sigma de pequena dimensão ao seu processo produtivo. Tratando-se de uma unidade que está num mercado tecnológico altamente competitivo a nível global, é necessário dotá-la de técnicas de gestão da qualidade que lhe permitam fidelizar os clientes e, adquirir vantagem competitiva, face uma concorrência que dispõe, em princípio, de factores de produção mais económicos. Isto, para garantir a sua sobrevivência no médio prazo.

2.11. O Processo de Montagem dos Circuitos Impressos

Há essencialmente duas fases necessárias para a montagem de um circuito impresso: (a) colocação dos componentes (resistências, condensadores, dispositivos activos) no substrato, e (b) soldar os componentes às pistas condutoras.

O processo de montagem pode ser integrado em categorias que correspondem, *grosso modo*, ao tipo de componentes a montar (Coombs, 2008):

- TH (*Trough-Hole*)
- SMT (*Surface Mount Technology*)
- Montagem mista, que consiste numa combinação das duas anteriores

Para cada uma destas tecnologias, há diferentes níveis de automatização que os recursos dos equipamentos utilizados permitem. O grau de automatização deve ser optimizado de acordo com o projecto do circuito, lista de materiais, capital despendido na aquisição do equipamento e custos actuais de produção. É importante recordar que, a montagem dos circuitos TH permanece uma tecnologia crítica na indústria electrónica, se bem que, não com a mesma importância que detinha antes do advento da montagem de superfície (SMT). A montagem TH continua a ser empregue, quase exclusivamente, em componentes de grande dimensão, tais como transformadores de tensão e corrente, filtros, condensadores de potência, bem como outros quaisquer, que requeiram suporte mecânico adicional. A segunda razão para a manutenção desta tecnologia é de carácter

económico. Pode ser simplesmente mais económico recorrer à montagem TH, conjugada com a soldadura manual, i.e., sem automatização, para produzir uma montagem dum sistema electrónico. Contudo, a tecnologia TH não está limitada à montagem manual. Existem diversos graus de automatização que podem ser utilizados para montar um circuito TH. No caso da empresa em estudo, para a montagem TH, recorre-se sempre à inserção manual, embora a soldadura possa ser executada de forma automática numa máquina apropriada (*wave - solder*).

2.11.1. Questões Derivadas dos Condicionamentos Legais

O aumento exponencial da produção e, a rápida obsolescência dos produtos electrónicos, levaram a União Europeia (EU) a publicar um diploma legal, de índole ambiental, com enorme impacto na indústria electrónica. Trata-se da Directiva 2002-95-EC, de 27 de Janeiro de 2003, do Parlamento e Conselho, que restringe o uso de certas substâncias tóxicas no equipamento eléctrico e electrónico. Esta Directiva é conhecida também por RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*). Este diploma torna ilegal a produção ou importação para os estados membros de equipamento electrónico que contenha substâncias proibidas, que tinham sido, até então, o suporte da produção da indústria electrónica. A legislação entrou em vigor em 2006 e, implicou, designadamente, a erradicação das soldas contendo chumbo, o que veio a colocar problemas à indústria de montagem electrónica.

É que, geralmente, os circuitos integrados, os dispositivos passivos e os conectores, não são concebidos para suportar temperaturas superiores à de fusão do eutético Sn-Pb da solda e, são construídos, para sobreviver a um ciclo térmico de curta duração. Os fabricantes de circuitos impressos e os fabricantes de componentes trabalharam no sentido de compreender o impacto provocado pela utilização de soldas sem chumbo.

Os componentes com encapsulamento em plástico são conhecidos por absorver humidade da atmosfera. À medida que estes componentes são aquecidos à temperatura da soldadura por refluxo (*reflow soldering*), a água expande-se, formando bolhas que podem causar a fractura do componente. Para contrariar este fenómeno os componentes são aquecidos antes da soldadura. Por outro lado, os regimes de temperaturas mais

elevadas exigidos pelas soldas sem chumbo vêm amplificar este fenómeno e, requerem maior atenção, durante os ciclos de secagem dos componentes. Há muitos componentes que podem não ser adequados para as temperaturas mais elevadas requeridas pelas soldas sem chumbo. Apenas os componentes certificados pelo fabricante devem ser utilizados (Coombs, 2008). Muitas das soldas sem chumbo têm, por outro lado, dificuldade em espalhar-se numa superfície de soldadura, e uma aparência mais granulosa (o que não é necessariamente um atributo negativo). A engenharia de processo necessita, por isso, de consultar as especificações do fabricante dos componentes cuidadosamente para estabelecer parâmetros seguros para a soldadura por refluxo com utilização de soldas sem chumbo.

2.11.2. Fundamentos da Soldadura dos Circuitos Electrónicos

Desde o início da electrónica a solda dominante tem sido a constituída pela liga de Sn-Pb, porque possui uma temperatura de fusão de 183° C e, uma temperatura de trabalho, de cerca de 205 a 230° C. Este acréscimo de temperatura é necessário para assegurar que todas as partes a soldar atinjam uma temperatura condizente com uma boa soldadura e assegurar a fluidez da solda no processo de soldadura. Todos os materiais existentes na indústria electrónica foram concebidos para trabalhar nesse regime térmico: circuitos integrados, componentes passivos, laminados para circuitos impressos e o equipamento associado ao processo de soldadura estão certificados para utilização a estas temperaturas. Actualmente, devido à Directiva. RoHS e legislação similar, a liga de Sn-Pb está a ser abandonada. As ligas substitutas requerem ainda maiores temperaturas de processo e necessitam de alterações nos componentes, laminados e mesmo nos equipamentos de processo (Coombs, 2008).

Há três elementos constituintes importantes numa junta de soldadura: os dois materiais ou superfícies a serem ligadas e a solda propriamente dita. Cada um deles tem o seu conjunto próprio de atributos e variáveis que contribuem para a facilidade e qualidade da soldadura. Um equilíbrio delicado das condições materiais e dos parâmetros do processo determina o aspecto da junta de soldadura, a sua robustez e fiabilidade. A

composição da solda, o acabamento superficial do condutor de ligação ao componente, da pista do circuito impresso ou do furo PTH¹⁶, factores ambientais, implicações químicas e condições térmicas, todas em conjunto, têm impacto no processo de soldadura (Coombs, 2008).

A solda é o cimento que liga os condutores às pistas do circuito, confere a robustez mecânica necessária a um sistema solidário fiável e, também, possui a condutibilidade eléctrica necessária ao funcionamento dos circuitos electrónicos. É, geralmente, uma liga metálica escolhida de forma a fundir a uma temperatura compatível com os outros materiais constituintes da montagem. Uma vez fundida, a solda deve “molhar” o condutor de ligação do componente e a pista condutora do circuito impresso. E, após a solidificação por arrefecimento, deve ter suficiente resistência de ligação para sobreviver às diferentes taxas de dilatação dos componentes associados, assegurar o serviço a temperaturas elevadas e, garantir, suficiente resistência mecânica ao choque e vibração.

Uma vez aquecida, a solda começa a formar uma ligação metálica com os outros metais que estão em contacto e, uma vez este processo começado, progride lentamente, levando a solda a espalhar-se à medida que dissolve as superfícies e ligas. A solda liquefeita é forçada pela tensão superficial a preencher os finos capilares e, a tensão superficial, permite que a solda flua à volta das superfícies metálicas, reforçando a resistência mecânica do conjunto de componentes – o circuito. O composto metálico entretanto formado é a essência da soldadura. Sem este composto metálico não há junta de soldadura. À medida que a solda se aproxima da temperatura de solidificação, a taxa de formação do composto metálico decresce significativamente e forma-se a junta de soldadura.

É crítico que a soldadura solidifique antes do manuseamento do circuito por duas razões importantes. Em primeiro lugar, um movimento acidental do circuito impresso pode causar a deslocação dos componentes no interior da solda derretida, o que pode resultar em defeitos, tais como circuitos abertos (falta de ligação) ou curto circuitos (pontes não desejadas entre pistas). Em segundo lugar, uma perturbação na transformação crítica da fase líquida para a sólida pode resultar numa degradação da qualidade da ligação. Este tipo de ligação tem uma aparência granular e, pode, inclusive, ter micro-fracturas

¹⁶ *Plated through hole* – furo metalizado para ligar duas camadas sobrepostas dum circuito impresso

provocadas pela interrupção intempestiva do processo de formação cristalina durante a solidificação (soldas frias) (Coombs, 2008). A taxa de arrefecimento no fim do processo de soldadura é tão importante para a qualidade da soldadura como o início do aquecimento. O arrefecimento brusco pode provocar fissuras nos componentes, ou degradação das características eléctricas, induzida pelos diferentes coeficientes de dilatação dos materiais em presença.

2.11.3. Técnicas de Soldadura

O método mais antigo que se conhece, ainda utilizado, é o do ferro de soldar, mas é inadequado para a montagem dos circuitos electrónicos modernos, que têm grande densidade de componentes. Os fornos de refluxo (*Oven Reflow*) e, o método de soldadura por onda de superfície (*Wave Soldering*), são exemplos de técnicas de soldadura em massa, nas quais, um circuito inteiro é soldado simultaneamente (ou sequencialmente, como no caso do *wave soldering*), e não componente a componente, como quando se utiliza o ferro de soldar. No caso da empresa em estudo, ambos os processos são utilizados e, daí, o interesse da sua descrição com algum detalhe.

A escolha de cada um dos métodos é ditada pelo tipo de componentes utilizados, pela qualidade das placas de suporte onde estes componentes se inserem, pela taxa de produção desejada, e pelos requisitos de qualidade dos pontos de soldadura. No entanto, não há regras rígidas para esta opção. Por exemplo, alguns tipos de componentes TH, que durante algum tempo permaneceram no domínio exclusivo do *wave soldering*, são actualmente soldados em conjunto com componentes de montagem de superfície (SMT), em fornos de refluxo. De forma semelhante, há componentes de montagem de superfície que são ligados em máquinas de *wave soldering* (Coombs, 2008).

O forno de refluxo (*Oven Reflow*, ver fig. 2.10, p. 70), é utilizado, sobretudo, para a montagem de componentes de montagem por superfície (SMT). Para preparar uma placa de circuito impresso para este processo de soldadura, utiliza-se uma Pasta de Solda (*solder paste*) que é depois depositada por intermédio de um *stencil* metálico, com o auxílio de uma espátula metálica, ou de polímero, denominada “*squeegee*” (ver fig. 2.9). Trata-se de um processo serigráfico prévio.

A Pasta de Solda contém, além da solda, um fluxo de soldadura destinado a preparar as superfícies metálicas em contacto para o processo de soldadura. Os componentes são, então, colocados na pasta de soldadura por uma máquina de inserção automática e, o conjunto da placa e dos componentes, é inserido num tapete rolante do forno de refluxo para um tratamento térmico específico. A temperatura do forno é aumentada gradualmente, segundo um ciclo previamente estabelecido pelo fabricante (ver fig. 2.11, p. 71). O fluxo existente na pasta de soldadura é activado por este aumento de temperatura e desoxida as superfícies metálicas dos componentes, as pistas condutoras do circuito impresso e a própria solda para impedir a formação de óxidos metálicos que perturbem o processo metalúrgico de fusão.



Figura 2.9 – Stencil e Squeegee

Finalmente, a temperatura aumenta gradualmente até liquefazer a solda (*reflow*), permitindo a junção dos componentes. Segue-se, um ciclo de arrefecimento gradual e controlado, que conduz à solidificação da solda e à ligação definitiva dos componentes. Se o ciclo de aquecimento for demasiado rápido, pode conduzir à formação de bolas de solda, que são esferas de solda isoladas, não necessariamente ligadas à junta de soldadura, e que podem ser problemáticas para os circuitos impressos, dada a possibilidade de formação de curto-circuitos entre pistas. Daí, a necessidade do perfil de aquecimento do forno ser controlado. De forma similar, o perfil de temperatura/tempo tem de ser ajustado cuidadosamente para impedir que se atinjam temperaturas excessivamente elevadas, que podem provocar a carbonização ou “caramelização” do fluxo de soldadura e, conseqüentemente, a degradação de qualidade da soldadura. O

circuito propriamente dito, também pode ser danificado por temperaturas excessivas ou não uniformes.

Até o mais simples dos fornos consiste em vários subsistemas: um túnel com isolamento térmico, um tapete rolante para transporte dos circuitos, um conjunto de elementos de aquecimento, sistemas de arrefecimento e ventilação. O túnel é uma passagem com isolamento térmico que atravessa longitudinalmente o forno aonde as placas dos circuitos são aquecidas e arrefecidas num processo contínuo de refluxo. Este túnel serve para isolar os aquecedores e as placas do ambiente externo e, também ajuda, a preservar as condições térmicas exigidas pelo processo (ver fig. 2.10).

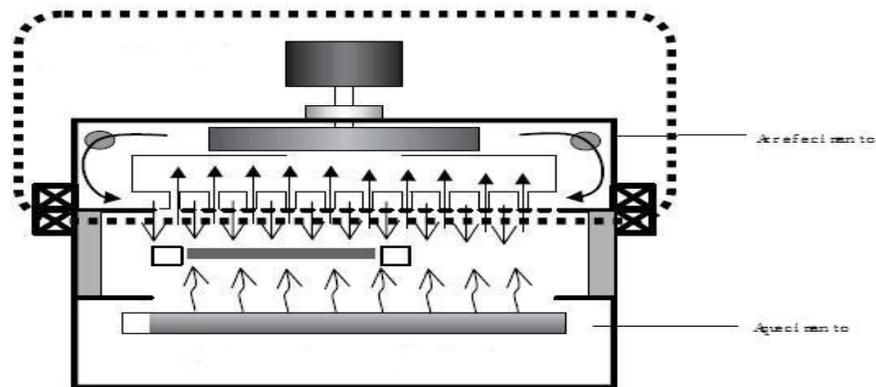


Figura 2. 10 – Forno de Reflow

A velocidade do tapete rolante é ajustada de acordo com o perfil de temperatura *versus* tempo desejados. Cada módulo de aquecimento é medido por intermédio de um termopar que serve para enviar o sinal necessário ao ciclo de realimentação do controlador de temperatura. É necessária uma uniformidade de temperatura ao longo do percurso, que não deve variar mais de 2° C. É ainda, necessária, uma ventilação para extracção dos fumos tóxicos gerados no túnel e, se esta não for eficiente, podem não se conseguir extrair todos os fumos nocivos. Porém, se o débito for excessivo, pode ser introduzido demasiado ar para o interior do túnel e o desempenho térmico pode vir a ser afectado.

Tão importante como a fase de aquecimento, é a fase de arrefecimento; a solda necessita ser reconduzida ao estado sólido antes da placa de circuito impresso poder ser manuseada. De outra forma, os componentes assentes em solda ainda no estado líquido, podem-se mover. Um material com as características da Pasta de Solda enquanto solidifica e cristaliza, se for sujeito a movimento, pode perturbar a formação da estrutura cristalina. As juntas de solda resultantes podem ser de pior qualidade e de menor fiabilidade. Alguns fornos baseiam-se no arrefecimento passivo, enquanto outros possuem elementos activos de arrefecimento tais como ventoinhas ou mesmo *chillers*¹⁷.

O perfil de temperatura *versus* tempo é de enorme importância no processo de soldadura por forno de refluxo. É a relação da temperatura com o tempo necessário para tornar a Pasta de Solda fluida que permite a soldadura dos componentes à placa e, o seu posterior endurecimento, por arrefecimento, antes da saída do forno (ver fig. 2.11, p. 72). A composição da Pasta de Solda, a disposição dos componentes na placa do circuito impresso (*layout*), o número de camadas do circuito, a composição do substrato, o tipo de componentes, o seu número e a sua densidade condicionarão ou influenciarão as características do perfil temperatura/tempo a utilizar.

O tipo de Pasta de Solda a utilizar, dita a temperatura máxima e, o tempo requerido, para a fusão. Pode, também, influenciar a taxa de arrefecimento posterior, pois, alguns tipos de solda, especialmente as isentas de chumbo, têm gradientes de arrefecimento preferenciais.

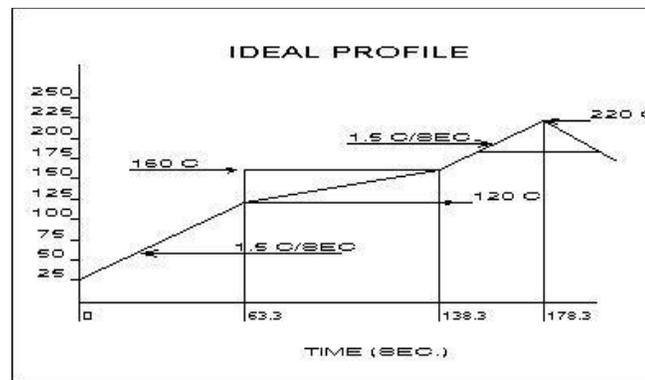


Figura 2. 11 – Perfil Térmico de Refluxo

¹⁷ Sistema de arrefecimento frigorífico composto por um radiador e uma ventoinha.

Um forno de refluxo precisa de reproduzir, com fidelidade, o perfil de refluxo para que a soldadura seja efectuada com êxito e qualidade. Cada uma destas fases precisa de ser ajustada de acordo com a composição da pasta utilizada e, se for suprimida qualquer das fases, pode ter como consequência a perda de produção. Há uma rampa inicial, correspondente ao pré-aquecimento das placas, Pasta de Solda e componentes. Nesta fase, a Pasta de Solda perde algum dos seus componentes voláteis e o fluxo de soldar torna-se quimicamente activo. Os invólucros dos componentes perdem humidade, evitando assim, a formação de bolhas. Se o gradiente for demasiado elevado, os componentes voláteis serão libertados muito rapidamente e, como resultado, a solda salpicará. Isto provoca a formação de bolas explosivas de solda e a diminuição do volume da solda, enfraquecendo as juntas soldadas. As bolas de solda podem ainda formar pontes entre as pistas condutoras do circuito e provocar curto-circuitos. O aquecimento excessivamente rápido pode, por sua vez, causar a fissuração dos componentes. Isto torna-se particularmente agudo com a utilização de componentes com invólucros do tipo cerâmico. Para ser seguro, o gradiente de aquecimento deve andar à volta dos 2 a 4° C, por segundo (Coombs, 2008).

A segunda fase de aquecimento corresponde a um aumento de aquecimento da Pasta de Solda, da placa e dos componentes: o fluxo existente na Pasta de Solda flui para todas as partes metálicas com as quais está em contacto, reage com os óxidos superficiais e remove-os. Actua, também, como uma barreira para prevenir a oxidação futura. Na fase seguinte, a Pasta de Solda é submetida a uma mudança de fase, passando de sólida a líquida. A solda líquida devido à tensão superficial, à capilaridade, e às correntes de convecção, flui ao longo das superfícies metálicas que foram tratadas pelo fluxo de soldar e, tende a preencher, as cavidades entre as diferentes partes e superfícies. Esta é a verdadeira essência do processo de soldadura e da formação duma junta de solda efectiva.

A última fase do ciclo corresponde ao arrefecimento. Muitos dos componentes que constituem o circuito electrónico são relutantes em perder calor, pois, são bons isolantes. É necessário assegurar que, ao retirar os circuitos do forno, as soldaduras se encontrem solidificadas, para que os componentes montados não sejam deslocados e para não perturbar o processo de solidificação da soldadura.

- Um outro processo de soldadura em massa é designado por *wave soldering* (ver fig. 2.12, p. 74). Em muitas unidades de produção o nível de defeitos neste tipo de soldadura é mais elevado do que para o processo de refluxo (Coombs, 2008). Os defeitos estão relacionados com a má parametrização do processo, o seu deficiente controlo, a concepção inadequada do circuito impresso, ou qualquer combinação destes factores. Embora o processo de soldadura por onda já exista há bastante tempo, ainda não é muito bem compreendido, devido, sobretudo, a serem elevados a variação das configurações das máquinas e o número das variáveis de processo em jogo.

O procedimento de soldadura por onda retirou o seu nome do facto de ser utilizado um tanque com solda líquida derretida para a soldadura de componentes electrónicos num circuito impresso. Neste procedimento, os componentes electrónicos são colocados na placa de circuito electrónico, nas suas posições exactas e, a placa é deslocada, passando por uma onda de solda derretida. A solda liga-se às partes metálicas expostas e, as regiões que não se pretende que sejam ligadas, são protegidas. O processo de soldadura por onda pode ser utilizado igualmente para placas furadas (TH), ou para placas com componentes de montagem à superfície. No caso dos componentes de montagem de superfície, estes são colocados no sítio com o auxílio de uma camada de adesivo antes de serem colocados na máquina de soldar.

Como presentemente, muitos dos circuitos electrónicos são montados, quase exclusivamente, com componentes de montagem de superfície, o processo de *wave soldering* tem sido substituído por fornos de soldadura por refluxo. Uma máquina de soldar por onda é constituída basicamente por três zonas: uma zona de deposição de fluxo, uma zona de pré-aquecimento e uma zona de soldagem.

As placas de circuito impresso com componentes TH (*Through-Hole*) e com componentes de montagem de superfície montados na parte inferior são, por vezes, montados em caixilhos de fibra de vidro ou titânio, com aberturas, para permitir a exposição à solda fundida. O titânio é utilizado porque a solda não adere a este metal. O caixilho é colocado num tapete rolante que transporta o circuito através da máquina. Quando a placa do circuito impresso entra na zona de fluxo, este é aplicado na zona

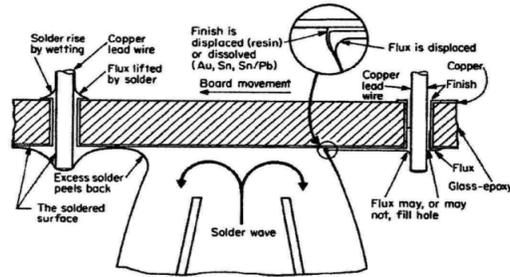


Figura 2. 12 – Soldadura por Onda. Fonte: Coombs (2008)

inferior da placa impressa. O nome do processo deriva do facto de a soldadura ser efectuada por meio de ondas de solda líquida. O processo usa um tanque de solda líquida, os componentes são inseridos ou colocados na placa de circuito impresso e, o circuito é passado numa onda, criada por meio de uma bomba. A solda molha as partes metálicas expostas, mas não as que estão protegidas por uma máscara protectora (*solder mask*), que é um revestimento que impede a solda de fazer pontes entre as pistas condutoras, provocando curto-circuitos. Existem muitas variáveis no processo associadas à operação de soldadura por onda. Se não forem compreendidas ou controladas, podem surgir defeitos, como a falta de solda nas pistas (circuitos abertos) e pontes de solda (curto-circuitos), tal como em qualquer outro processo de soldadura.

Um outro defeito que poderá ocorrer, tem a ver com a influência do processo de soldadura por onda no lado secundário do circuito impresso, que se poderá reflectir no lado primário, aonde estão montados os componentes SMD. Se os parâmetros de controlo não forem adequadamente ajustados, é possível que, se atinjam temperaturas elevadas no lado primário do circuito impresso e, os componentes SMD, sejam atingidos por um processo de fusão da soldadura (*reflow*). Isto pode provocar, mais uma vez, o surgimento de curto-circuitos, circuitos abertos, ou juntas com falta de solda. Este fenómeno está mais associado com circuitos impressos finos, densamente povoados, de dupla face, com componentes SMD de dimensão reduzida, soldados na face primária do circuito. A condução térmica a partir da onda, através das pistas metálicas do circuito, pode gerar calor suficiente para que componentes previamente soldados se dessoldem novamente. A solda pode ainda ser drenada pelos furos e pistas, provocando circuitos abertos ou soldaduras de juntas enfraquecidas, criando soldaduras com a forma de

ampulheta, desde a pista até à origem do terminal condutor do dispositivo electrónico (Coombs, 2008).

2.11.4. Defeitos

Os circuitos impressos são utilizados por equipamento electrónico sofisticado, desde computadores até aparelhagem doméstica. Fabricar circuitos electrónicos envolve a colocação de um grande número de pequenos componentes em posições precisas e fixá-los no lugar, por soldadura. Devido à ênfase na miniaturização, a tendência é para a redução do tamanho dos componentes e, para a redução do espaço entre eles, tanto quanto o permitem as características eléctricas. Por isso, a possibilidade de aumentos de possíveis falhas e defeitos e, do número de localizações onde essas falhas podem ocorrer, têm aumentado. Consequentemente, a identificação dos problemas de qualidade tem-se tornado cada vez mais difícil (Allen, 2006).

Pode-se dizer que uma unidade está não conforme, se, pelo menos uma das suas características associadas à qualidade, se encontra fora dos “limites de especificação”. Estes limites são impostos pelos projectistas e, uma empresa não emprega muitas vezes o termo “defeito” ou “defeituoso”, porque as especificações de projecto podem não corresponder àquilo que o cliente realmente deseja. Muitas vezes, refere-se o *Yield*¹⁸ em vez da proporção de não conformes. Se a capacidade do processo, ou a proporção de não conformes, é de p_0 , então $1 - p_0$, corresponde à designação de *Yield* normal (Messina, 1999).

Os maiores defeitos que surgem na montagem de circuitos impressos, estão relacionados com a qualidade das soldaduras. Alguns estudos, referem que, os defeitos surgidos nas juntas de soldadura são responsáveis por cerca de 60 por cento dos defeitos surgidos em montagens de superfície (Siong-Lin Ho, 2003). Para monitorizar os defeitos no processo de soldadura por onda de circuitos impressos têm sido utilizados as tradicionais cartas de controlo \bar{u} e c (J.P.C.Tong, F.Tsung, & B.P.C.Yen, 2004). A utilização da análise de Pareto para proceder à identificação do tipo de defeitos mais recorrentes e, a adopção das distribuições de Poisson e Binomial, também têm sido

¹⁸ Rendimento da produção.

propostas por alguns autores (Siong-Lin Ho, 2003). Vários outros trabalhos têm sido desenvolvidos no âmbito do DOE – *Design of Experiments*, no que concerne à determinação da influência dos diversos parâmetros de impressão para otimizar a altura da Pasta de Solda no processo de deposição no circuito, ou para identificação dos factores críticos que afectam o rendimento (*yield*) do processo de soldadura por onda (Siong-Lin Ho, 2003).

Lasky (2003), refere também, que, mais de 60 por cento dos defeitos na montagem de SMD podem ser atribuídos à Pasta de Solda e ao processo de impressão. O processo de fusão é responsável, segundo este autor, por cerca de 15 por cento dos defeitos. Demasiada pasta na pista pode ser responsável pela formação de curto circuitos, enquanto que, pouca pasta, pode resultar em circuitos abertos. A observância da especificação do volume da pasta e, a monitorização do processo, para assegurar a conformidade com as especificações, têm tido efeitos positivos no rendimento do processo (*Yield*).

Uma das formas de efectuar este controlo é através de cartas de controlo (Lasky, 2003). Também Siong-Lin Ho (2003), refere que, o processo de deposição da Pasta de Solda é o processo mais crítico para se atingir alto rendimento na montagem de circuitos impressos (*Yield*) e, tem impacte significativo nos processos a jusante, bem como, na fiabilidade das juntas das soldaduras (ver fig. 2.13, p. 77). A aplicação da quantidade correcta de pasta na pista desejada (*pad*) é essencial, pois, pasta em quantidade insuficiente pode provocar circuitos abertos e, excesso de pasta, pode causar curto circuitos. Estes autores referem ainda que, é prática corrente da indústria a utilização de cartas da média e da amplitude para controlar a altura, ou o volume, da deposição da Pasta de Solda que são duas características importantes da qualidade das soldaduras. Em processos SMD podem-se encontrar circuitos impressos com vários tipos de defeitos. A carta de controlo c tem sido usada tradicionalmente para controlar um tipo único de não conformidade ou defeito (Siong-Lin Ho, 2003).

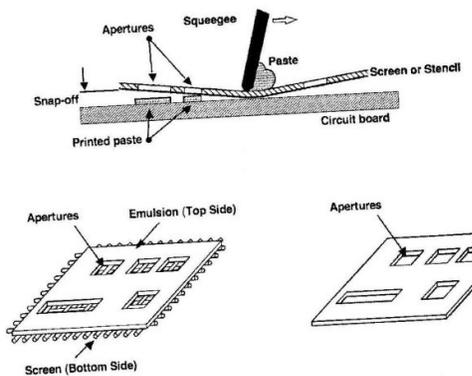


Figura 2. 13 – Deposição da Pasta de Solda

Para Tong et al.(2004), e também para Lasky (2003), o processo com maior quota de responsabilidade na montagem de SMT pode ser atribuído à colocação de Pasta de Solda e ao processo de serigrafia (60% dos casos). Ao processo do forno de refluxo estes últimos autores atribuem cerca de 15% dos casos. Já Pyzdek (2003), diz que, os defeitos são, na sua maior parte, provocados pelo manuseamento (*touch up*), e não por defeitos provocados pelo processo de soldadura (*wave-solder*). Este autor considera ainda que, um programa de manutenção preventiva é essencial para prevenir defeitos. Kirzhner (2005), demonstrou que os defeitos das soldaduras devem ser tratados essencialmente como atributos, e que, o processo de inspeção pode detectar defeitos de forma mais ou menos rigorosa. Verificou também que, os circuitos mais complexos dão origem a maior número de defeitos, sendo estes, na sua maior parte, provocados por excesso de solda (curto-circuitos) ou por falta de solda (circuitos abertos).

2.12. Critérios de Qualidade de Aceitação dos Produtos

Além da relação financeira entre o fornecedor e o cliente, não há nada que afecte, de modo mais intenso, a relação entre estas duas partes, do que a aceitação do produto e a sua qualidade. Como o circuito impresso é a base para quase todos os circuitos electrónicos, o cliente não pode aceitar placas defeituosas. Por outro lado, os custos são sempre um factor crítico e, impor critérios excessivos e desnecessários de qualidade, pode ser uma desvantagem competitiva para o produtor. A incapacidade de produzir um produto de qualidade é um factor com grande responsabilidade na deterioração da

relação entre cliente e fornecedor. Todos os dispositivos que compõem um produto electrónico se suportam num circuito impresso para obter informação e transportar energia de um local para outro. Uma interrupção deste processo, provocada por um circuito impresso defeituoso, tem como consequência, um produto incapaz. Por outras palavras, um produto de baixa qualidade, mesmo a baixo preço, não tem valor.

O sucesso ou fracasso de um produto está directamente relacionado com a qualidade percebida pelo cliente relativamente à marca. Uma publicidade negativa devida a falhas de qualidade pode ter um impacto significativo no prestígio da marca. Mas, uma vez estabelecidos critérios de qualidade e aceitação entre o fornecedor do produto e o cliente, fica significativamente reduzida a probabilidade de entrega de circuitos impressos não conformes com as especificações. Se o cliente estabelece, com clareza, quais os critérios de aceitação e qualidade que pretende para o produto junto do fornecedor, este pode estabelecer, com maior rigor, os custos de fabrico necessários e, por conseguinte, o preço de venda final.

Os produtos de baixa qualidade são inaceitáveis, acabam por não poder ser vendidos, e são custos directos significativos, que um produtor consciente não quererá suportar. Critérios de aceitação e qualidade, devidamente constituídos e negociados, fornecem ao cliente e, ao produtor, um quadro claro do que é esperado pelas partes. Sem instruções claras sobre como a aceitação do produto e, a sua qualidade, devem ser implementadas pelo produtor, o cliente muito dificilmente obterá um produto que satisfaça os seus requisitos e expectativas.

Nessa conformidade, e dado tratar-se de tecnologia com algum grau de sofisticação, a montagem de circuitos impressos requer que o produtor estabeleça com os clientes regras de aceitação dos produtos e de garantia de qualidade que permitam o estabelecimento de parcerias destinadas a assegurar a satisfação dos clientes e a sustentabilidade do negócio. O projecto que foi estabelecido na **Tecnimaster** procura contribuir para este objectivo ao fazer diminuir o número de defeitos existentes nas juntas de soldadura.

III. METODOLOGIA DA INVESTIGAÇÃO

3.1. Introdução

O principal objectivo deste capítulo é descrever e justificar o esquema e os procedimentos de investigação utilizados no presente trabalho. Este, será enquadrado na metodologia de investigação do “Estudo de Caso”. A metodologia do Estudo de Caso é utilizada frequentemente em situações da vida real, quando se pretende, deliberadamente, cobrir as condições do contexto envolvente por se acreditar que elas são altamente pertinentes para o estudo do fenómeno em análise (Yin, 2003).

A estratégia do Estudo de Caso não se deve confundir com “pesquisa qualitativa”. Em vez disso, o Estudo de Caso pode ser baseado em qualquer mistura de pesquisa qualitativa e quantitativa. Pode incluir e, mesmo limitar-se, a evidência quantitativa. De facto, o simples contraste entre evidência qualitativa e quantitativa não serve para distinguir as diferentes estratégias de investigação. Alguns investigadores fazem a distinção entre pesquisa qualitativa e quantitativa – não na base do tipo de evidência, mas na base de concepções filosóficas completamente diferentes (Yin, 2003).

Será analisada a recolha de dados, que foi efectuada através de observação, análise documental e entrevistas. A validade do trabalho será discutida, bem como as suas limitações. A vantagem do Estudo de Caso reside no facto de permitir medir e registar comportamentos e, a possibilidade, de reunir várias fontes de dados em simultâneo. Estas podem incluir documentação, registos, entrevistas, observações directas e instrumentos físicos de medida.

3.2. Objectivos da Investigação

Como foi indicado no capítulo I, os objectivos deste trabalho, são os seguintes:

- Efectuar um estudo preliminar para implementar um projecto Seis Sigma numa pequena empresa.
- Diminuir a taxa de avarias no processo de montagem dos circuitos impressos.

3.3. Tipo de Pesquisa

A investigação levada a efeito pode ser considerada como aplicada e, quanto à forma de abordagem ao problema, como mista, uma vez que, incide sobre a exploração de um processo e confia na recolha de dados quantitativos. A pesquisa aplicada tem por finalidade gerar conhecimentos para uma aplicação prática. Por outro lado, numa pesquisa qualitativa, considera-se que existe uma acção dinâmica entre o mundo real e o sujeito, que requer uma interpretação dos fenómenos estudados. Outras características da pesquisa qualitativa, são:

- O ambiente natural onde a acção se desenrola é fonte directa de recolha de dados e, o investigador, é o elemento chave para esta actividade.
- Os investigadores tendem a analisar os dados e fenómenos de forma indutiva.
- O processo estudado e, o seu significado, formam o núcleo principal da questão.
- A pesquisa enfatiza a sequência dos factos ao longo do tempo (pesquisa longitudinal).
- A investigação é fortemente baseada na análise de textos, em detrimento dos números.

Quanto aos objectivos do estudo, o presente trabalho pode ser classificado como sendo um Estudo de Caso de explanação, ou interpretativo. De acordo com Yin (2003), este tipo de pesquisa, tem por finalidade, explicar uma determinada realidade em contraste com uma teoria de suporte, lidando, sobretudo, com ligações operacionais dependentes de um grupo de pessoas (e.g., uma empresa). Esta forma de perceber a realidade faz com que o investigador adquira maior familiaridade com o tema da pesquisa.

3.4. O Estudo de Caso

Yin (2003), define Estudo de Caso como uma metodologia de investigação, apropriada para estudar fenómenos contemporâneos, a serem investigados no seu contexto de vida real, quando as fronteiras entre o fenómeno e o seu contexto são indefinidas e, quando

são utilizadas, múltiplas fontes de evidência. O Estudo de Caso é uma estratégia de pesquisa com fundamentos empíricos que investiga um fenómeno segundo um conjunto de procedimentos pré-especificados. É adequado, na opinião de Yin (2003), para estudar o “como” e o “porquê” de um determinado fenómeno sobre o qual o investigador tem pouco, ou nenhum controlo. Examina o fenómeno no seu meio natural, a partir de múltiplas fontes de evidências e recorre a técnicas diversificadas de colheita de dados, como sejam entrevistas, observações e relatórios, entre outros.

As técnicas utilizadas na investigação podem ser variadas, podendo incluir abordagens qualitativas e quantitativas. Em vez de utilizar unicamente amostras e, seguir um protocolo rígido, para examinar um número reduzido de variáveis, o estudo de caso envolve uma investigação em profundidade, e um exame longitudinal de uma simples instância, ou acontecimento: o caso. O estudo de caso de um único assunto fornece suporte estatístico para fazer inferências a partir de dados recolhidos por um estudo quantitativo. O primeiro passo de uma pesquisa baseada num Estudo de Caso consiste em estabelecer um objectivo firme, ao qual o investigador se possa referir, durante o decurso do estudo de um fenómeno ou objecto complexos. O investigador estabelece o enfoque da pesquisa, formulando questões acerca da situação ou problema a ser estudado e, define, o propósito do estudo.

Um Estudo de Caso pode ser exploratório (para induzir uma pesquisa posterior), descritivo (narrativo), ou do tipo explanar/instrumental (para testar teorias). A pesquisa baseada num Estudo de Caso responde geralmente a uma ou duas questões que começam com o “como” e o “porquê”. Para ajudar a promover a formulação das perguntas os investigadores efectuam geralmente uma revisão da literatura. O Estudo de Caso permite que o investigador estude a situação, mantendo em relação a esta uma distância adequada, suficientemente perto para permitir a sua compreensão, mas permanecendo razoavelmente distante para não influenciar os acontecimentos. Um dos pontos fortes do Estudo de Caso envolve a possibilidade da utilização de várias fontes e técnicas de recolha de dados. O investigador determina antecipadamente quais as evidências que deve reunir e, quais as técnicas de análise a utilizar, para responder às questões colocadas na pesquisa. Os dados podem ser maioritariamente qualitativos, mas, podem ser, também, do tipo quantitativo.

As abordagens de pesquisa orientadas para a Engenharia de Produção são, normalmente, de cunho quantitativo quando se referem a temas técnicos da engenharia, ou qualitativas, se o tema está associado à gestão dos recursos humanos. A pesquisa quantitativa permite a realização de medidas, as quais, por sua vez, podem comprovar ou rejeitar as hipóteses e proposições formuladas no início do trabalho. O objecto da pesquisa é a busca de relações de causa e efeito, que podem, posteriormente, ser objecto de generalizações. O processo como um todo, deve ser passível de replicação, para ser consistente.

Todo o tipo de investigação empírica tem uma concepção implícita, quando não explícita, de pesquisa. No sentido mais elementar, a concepção da pesquisa é a sequência lógica que liga os dados empíricos às questões iniciais da pesquisa e, por último, às suas conclusões. A concepção da pesquisa lida com, pelo menos, quatro problemas: quais as questões a estudar, quais os dados relevantes, quais os dados a recolher e, por fim, como analisar os resultados. A concepção da pesquisa é muito mais do que um plano de trabalho.

Um erro fatal ao executar estudos de caso é confiar na generalização estatística como método de generalização dos resultados dum estudo de caso. O método de generalização que deve ser utilizado é a “generalização analítica”, na qual, uma teoria desenvolvida previamente, é utilizada como suporte de comparação dos resultados empíricos resultantes do estudo de caso. Na generalização analítica o investigador tenta proceder à generalização de um conjunto particular de resultados para uma teoria mais ampla. A generalização não é, contudo, automática. A teoria necessita ser confirmada por replicação e, os mesmos resultados devem ocorrer, quando os fenómenos são estudados por investigadores diferentes (Yin, 2003).

Se se trata de pesquisa qualitativa, o objecto da pesquisa é, o “como” e o “porquê” dos comportamentos e, a pesquisa, é profundamente afectada pelo contexto em que está inserida. Neste caso, a análise efectuada enfatiza a sequência de acontecimentos ao longo do tempo, enquanto o processo propriamente dito, é pouco estruturado. As conclusões são normalmente interpretativas, o que dificulta as generalizações. O investigador está próximo do fenómeno a ser estudado e o assunto é, de certa forma, uma parte de uma realidade mais complexa. As principais formas de recolha de dados

para este tipo de pesquisa são as observações, as entrevistas e a análise da documentação.

Para o presente trabalho, o método escolhido foi o Estudo de Caso, pelo facto de ele tratar melhor quatro pontos básicos, identificados por Yin (2003), que se julga serem adequados ao tipo de fenómeno em análise:

- As questões propostas (o “como e “porquê”).
- O controlo que o investigador exerce sobre os factos.
- O momento em que os factos acontecem: no tempo actual.
- O tipo de variáveis do ambiente de estudo.

O Estudo de Caso estabelece um processo para recolher, analisar e interpretar as observações do investigador. É um modelo lógico, baseado em evidências, que permitem fazer inferências a respeito das relações causais entre as variáveis sob investigação.

3.4.1. Fases de um Estudo de Caso

A elaboração de um estudo de caso deve apresentar um conjunto de actividades agrupadas em três fases: 1) Definição e Planeamento; 2) Recolha de Dados; 3) Conclusões (Yin, 2003). Na fase de Definição e Planeamento, deve-se formular de maneira explícita e compreensível o problema que se pretende resolver ou discutir e a sua operacionalização. Deve, também, ser feito o levantamento do suporte teórico necessário à sua resolução. As variáveis necessárias à operacionalização das hipóteses formuladas devem ser identificadas. Deve ainda, proceder-se à identificação da lógica da ligação dos dados às proposições formuladas.

A fase de recolha de dados para a investigação envolve as seguintes etapas: escolha do roteiro de pesquisa; determinação do perfil das pessoas a serem entrevistadas pelo investigador, no sentido de garantir o seu apoio e a prestação de informações; programação do acesso às fontes de dados e agenda de trabalho para seu levantamento; investigação da documentação relevante para o trabalho. A fase de conclusões da investigação é constituída pela organização dos dados recolhidos e da sua comparação com a teoria de suporte; pela análise dos resultados, que consiste na sua interpretação e

comparação com as hipóteses de pesquisa; pela elaboração das conclusões e a sua revisão.

3.4.2. Tipos de Estudos de Caso

Os estudos de caso podem ser classificados como holísticos, ou embutidos (*embedded*). No primeiro caso, o enfoque é no fenómeno como um todo e, não, no destaque de cada um dos seus componentes, separadamente. Nos estudos de caso embutidos, onde a pesquisa é enquadrada, enfatiza-se a importância de cada componente, processo, ou fase, de um determinado fenómeno. No presente trabalho, uma vez que a aplicação e o desenvolvimento do Seis Sigma se podem fazer mais adequadamente processo a processo é adoptada a segunda classificação.

3.4.3. Protocolo do Estudo de Caso

Yin (2003), define como protocolo do estudo de caso o instrumento que contém todos os procedimentos, regras gerais e descrição das actividades necessárias à condução e realização do Estudo de Caso. Uma das suas finalidades mais importantes é garantir a fiabilidade da pesquisa. Os seus componentes são os seguintes:

- Visão geral do estudo de caso - definição e objectivos do estudo de caso.
- Selecção das fontes de informação - estabelecer os critérios adoptados para seleccionar as fontes de informação.
- Questões de estudo - as questões que modulam o problema de pesquisa, as propostas de solução e as variáveis de análise.
- Procedimentos de campo - detalham os procedimentos e actividades necessárias à realização do estudo de caso.

Ainda de acordo com Yin (2003), o investigador, ao elaborar um estudo de caso, deve ter em atenção as fontes de pesquisa, a qualidade dos dados obtidos e a análise do material recolhido. Este autor entende que as principais fontes de evidência, são:

- **As entrevistas** – correspondem ao contacto pessoal entre o investigador e os entrevistados. As entrevistas realizadas no decurso do presente trabalho foram do tipo espontâneo, direccionadas para a opinião e interpretação do entrevistado sobre determinada matéria, de modo a obter respostas “abertas”.
- **A documentação** – a utilização mais importante dos documentos é confirmar e validar as evidências provenientes de outras fontes. No trabalho actual, foram consultados documentos relacionados com a operação dos equipamentos e máquinas utilizadas no processo de fabrico, bem como documentos relacionados com o sistema de gestão da qualidade da empresa em análise, decorrentes da sua certificação ISO 9001:2000.
- **A observação directa** – a observação directa permite ao investigador conhecer as situações e problemas estudados, avaliando pessoalmente as condições, restrições, cenário no qual ocorre o fenómeno em estudo e, recolher informações, muitas vezes não verbalizadas ou documentadas.

3.5. Classificação dos Dados

3.5.1. Dados primários

Um método elementar para descobrir o que os colaboradores duma organização pensam acerca de um determinado fenómeno ou problema, é questioná-los. Isto pode ser efectuado através de uma entrevista ordinária, ou por meio de um questionário. A eficácia de uma entrevista qualitativa reside no facto de ela se processar numa situação análoga ao dia-a-dia ou a uma vulgar conversa. Algumas das entrevistas realizadas no decurso deste trabalho foram do tipo semi-estruturado, uma vez que, as questões e tópicos focados foram preparados antecipadamente. Foram, também, efectuadas conversas e entrevistas não estruturadas, informais, com os técnicos e operadores que se encontravam familiarizados com as actividades e problemas práticos do processo produtivo. Os dados primários utilizados no projecto de melhoria DMAIC foram reunidos através do recurso a ferramentas descritas em detalhe no capítulo II do presente trabalho. Entre estas, podem-se incluir o mapa de processos, os gráficos de Pareto, os diagramas de causa e efeito, as folhas de verificação e as cartas de controlo.

3.5.2. Dados Secundários

Os dados secundários recolhidos para o projecto de melhoria foram obtidos através da consulta de ficheiros de reclamações e de literatura da especialidade.

3.6. Desenvolvimento e Objectivos da Metodologia Seis Sigma

Os seres humanos observam o mundo de forma diferente e, por isso, há diferentes perspectivas na ciência e tecnologia. Na realização de investigações há duas visões opostas dominantes: o positivismo e a hermenêutica. A corrente positivista afirma que, uma tese científica apenas tem valor se poder ser verificada empiricamente. A abordagem positivista apenas admite fontes de conhecimento a partir de observações e da dedução lógica. A corrente oposta ao positivismo é designada por hermenêutica, que pode ser definida, como a ciência da interpretação. Trata da interpretação dos significados no sentido mais lato do termo.

Esta dissertação, ao investigar a possível implementação de um sistema Seis Sigma numa pequena empresa tem elementos retirados do positivismo e da hermenêutica. Foram recolhidos dados qualitativos através de entrevistas e ao utilizar o projecto DMAIC. A interpretação e análise destas fontes de dados, fundadas na interpretação de teorias existentes, são exemplos duma abordagem hermenêutica. Contudo, há também aspectos da teoria positivista. Um projecto DMAIC inclui dados quantitativos, decisões baseadas em factos e dedução lógica.

Muitas das medidas de desempenho, quer organizacional quer humano, são quantificáveis e, devem ser analisadas, de forma a eliminar conclusões erradas baseadas em interpretações incorrectas dos dados. Esta necessidade facilitou a aplicação das técnicas Seis Sigma aos esforços de melhoria do desempenho humano (Pande, Neuman, & Cavanagh, 2002). O Seis Sigma é um modelo analítico estruturado com a finalidade de melhorar o desempenho a partir da redução da variação dos processos. Incide na melhoria dos processos através da redução das fontes de erro pela aplicação estruturada de instrumentos de análise estatística. É, em si mesmo, uma metodologia sistemática e

analítica, baseada em processos, que determina as causas e a amplitude dos erros que fazem diminuir o desempenho das organizações. Utiliza o paradigma DMAIC que é a metodologia geralmente aceite para gerir os projectos Seis Sigma destinados à melhoria dos processos, tais como a redução de defeitos, ou aumentar a disponibilidade dos sistemas (Rath & Strong, 2004), como se viu no ponto 2.8.

Os passos de melhoria contínua têm um evidente paralelismo com as fases da metodologia da *Action Research* (Planear, Agir, Observar, Reflectir, Replanear) e podem ser facilmente integrados nesta metodologia, suportando assim o argumento da compatibilidade entre as duas metodologias. A *Action Research* é uma metodologia destinada à resolução de problemas, assente em dados e baseada nos princípios do método científico. É utilizada para se aprender acerca das organizações com o intuito de implementar a mudança destinada a melhorar as organizações. Tradicionalmente, suporta-se em dados de pesquisa e em processos de *feedback*.

3.7. O Projecto de Melhoria

A empresa em análise (www.tecnimaster.com) tem como objecto a concepção e fabrico de circuitos e sistemas electrónicos e, é uma pequena empresa, com cerca de quinze colaboradores. A sua componente produtiva está localizada na área industrial da Várzea, no Concelho de Santo Tirso. Esta unidade dedica-se essencialmente à montagem, incluindo a soldadura e a inserção de componentes discretos e integrados, de circuitos impressos. Uma parte substancial do seu negócio, cerca de metade, consiste na subcontratação, i.e., na montagem (*assembling*) de circuitos de terceiros que não dispõem, do parque de máquinas e do pessoal necessário para o efeito, e entregam este conjunto de actividades por *outsourcing*.

Segundo foi dito pelo responsável técnico da parte produtiva, hoje em dia, não é economicamente rentável o fabrico de circuitos impressos na Europa, pelo que, quase toda a produção destes é subcontratada fora. Socorre-se, para isso, de fornecedores asiáticos que colocam cá o produto a preços competitivos e inferiores aos praticados na Europa. Há também razões de carácter ambiental que concorrem para esta prática, uma vez que, para a produção daqueles produtos, há resíduos químicos que necessitam

tratamento e armazenagem apropriados. Assim sendo, a actividade produtiva da empresa circunscreve-se à montagem dos componentes nos circuitos impressos adquiridos fora, sendo estes utilizados para a sua produção primária ou para servir encomendas de terceiros. A componente de concepção própria concentra-se na concepção e fabrico de alarmes para a indústria automóvel, bem como outros subsistemas para esta indústria, tais como, sistemas de posicionamento por GPS¹⁹ e sensores de estacionamento para viaturas. Ainda se dedicam à montagem e instalação de sistemas de alarme para edifícios.

Interessa, agora, referir o processo acerca do qual se incidiu a atenção, e que é, o da montagem e soldadura de componentes em circuitos impressos, e quais as técnicas utilizadas para esta finalidade. No sentido de se proceder à melhoria do processo de montagem dos circuitos impressos da **Tecnimaster**, foi desenvolvido um projecto de melhoria, de que se anexa o respectivo diagrama simplificado (ver fig. 3.1, p. 90). Este projecto é relativo à montagem de um circuito electrónico para um receptor de telemetria, em tecnologia GSM²⁰, fornecido por uma entidade externa. O projecto de melhoria segue o roteiro DMAIC e, é composto, pelas seguintes fases:

1. Na fase de **Definição**, procedeu-se à elaboração de um mapa do processo produtivo da **Tecnimaster** relativo à montagem de circuitos impressos (ver fig. 4.3 e fig. 4.4, pp. 104,105). Esta técnica, dispõe esquematicamente a série de actividades inter-relacionadas e as actividades que transformam as entradas em saídas do processo, tendo como actividade inicial de interesse para o projecto em estudo, a que se refere ao subprocesso de contratação. Isto porque, quer os componentes electrónicos, quer a placa do circuito impresso propriamente dita, foram fornecidos pela empresa subcontratante, tratando-se apenas, de proceder à montagem do circuito. Os resultados finais do processo produtivo são função das variáveis e entradas utilizadas. Nesta fase, foram ainda auscultados os requisitos do cliente, de forma indirecta, através de entrevistas com os colaboradores da **Tecnimaster**. Finalmente, foi integrada esta informação com as características do processo de montagem, obtidas através do respectivo mapa de processo. Isto, permitiu determinar quais as características críticas (CTQ) do processo face aos requisitos do cliente, através da construção de uma matriz de

¹⁹ *Global Positioning System* – sistema de localização geográfica por satélite

²⁰ *Global System for Mobile Communications*

inter-relações de um QFD (ver fig. 4.5, p. 107). Esta ferramenta relaciona os requisitos do cliente (é preciso não esquecer a voz do consumidor), com as entradas e saídas do processo de fabrico. As necessidades do cliente estão divididas, em requisitos primários e secundários. Foi também considerada a importância relativa de cada requisito. A saída do QFD, obtida após ponderação, indicou que os esforços de melhoria se deveriam dirigir para as actividades do subprocesso de colocação da pasta de solda, o que vem confirmar alguns dados obtidos por autores tais como Messina (1999) e Tong et al.(2004).

2. A fase de **Medida** consistiu na recolha de uma amostra aleatória de 100 unidades do circuito, após montagem e soldadura, para recolha do número de defeitos. Da contagem destes (41) e, dado tratar-se de um processo por atributos, foi calculada a capacidade geral do processo, bem como o nível sigma correspondente (4,30).
3. Na fase de **Análise** e, no sentido de decompor o processo geral de montagem nas suas diferentes actividades e subprocessos, para se determinar quais os mais críticos (“*vital few*”), procedeu-se a uma análise de Pareto, para se determinar o tipo de defeitos e a sua frequência. Verificou-se que os maiores contributos se situavam no domínio dos circuitos abertos e curto-circuitos, respectivamente. Através de um diagrama de Causa e Efeito, foram investigadas, em colaboração com o pessoal da **Tecnimaster**, as possíveis causas que lhes deram origem. Como consequência, chegou-se à conclusão que o principal responsável pelo aparecimento de defeitos nas soldaduras era o subprocesso de deposição da pasta de solda. Em seguida, calculou-se a capacidade e o nível sigma deste subprocesso (3,33), tendo-se chegado à conclusão que era inferior ao do processo principal.
4. Na fase de **Melhoria**, dirigiram-se os esforços para o subprocesso de serigrafia, responsável pela deposição da pasta de solda, no sentido de elevar a sua capacidade para, dessa forma, aumentar a capacidade do processo geral, uma vez que, esta é a resultante do produto das capacidades dos diferentes processos constituintes. Nesse sentido, realizou-se uma experiência factorial fraccionada de resolução V, utilizando uma amostra de 16 unidades, para determinar quais as

variáveis (factores) mais importantes presentes no subprocesso de deposição da pasta de solda. Após a sua determinação, não foi possível, contudo, realizar a optimização dos factores, fazendo outras experiências, devido aos constrangimentos impostos pela gerência.

5. A fase de **Controlo** não foi realizada. Teria consistido na aplicação de Cartas de Controlo, destinadas a assegurar que, os ganhos entretanto conseguidos, na fase de Melhoria, se mantivessem.

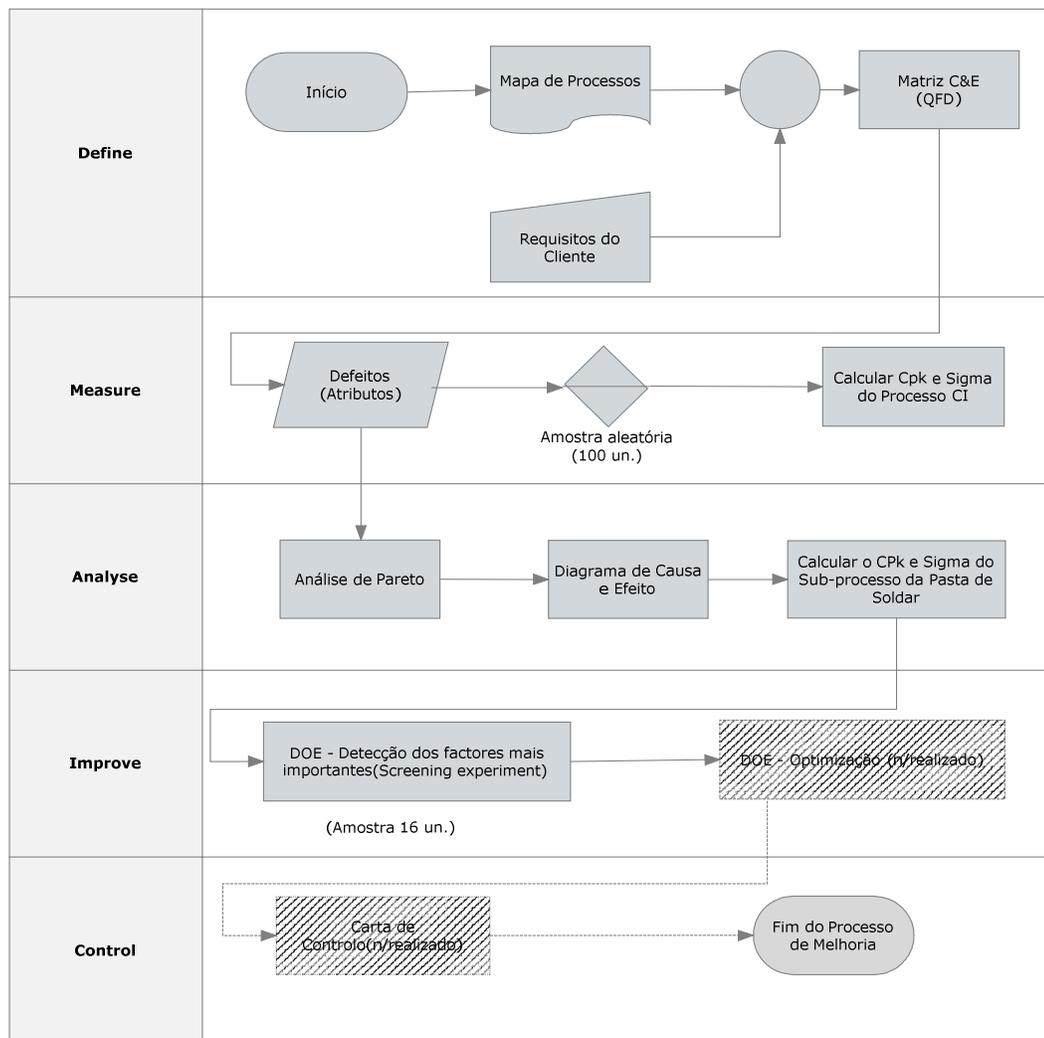


Figura 3. 1 – Diagrama do Projecto de Melhoria

Como já foi referido, na fase inicial do estudo foi feita a recolha de uma amostra aleatória de 100 unidades de uma encomenda de 1000 circuitos de uma subcontratação para a montagem de um *modem* GSM²¹. O trabalho decorreu durante um mês, aproximadamente. Após a determinação do número de defeitos, utilizou-se uma análise de Pareto, para verificar quais as não conformidades e os parâmetros associados a tratar de forma prioritária.

Os passos da DOE foram definidos de forma a conhecer a resposta do sistema a estudar, identificando os factores com implicação no resultado e o seu nível. De forma a reduzir o número de ensaios, utilizou-se uma experiência factorial fraccionada. Esta, utiliza apenas, uma fracção da combinação total possível dos níveis. Os factores foram escolhidos atendendo à sensibilidade dos colaboradores da **Tecnimaster** e, às opiniões formuladas a este respeito por Sekharan (2006) e Tong et al. (2004), que publicaram trabalhos relacionados com a aplicação da DOE na melhoria da aplicação de Pasta de Solda em circuitos impressos. A experiência é do tipo $2^{5-1} = 2^5 / 2 = 16$ tentativas, com o gerador I = ABCDE, de resolução V²² (Henderson, 2006). Neste caso, qualquer factor principal é confundido (*aliased*) com uma interacção de quarta ordem e, qualquer interacção de dois factores é confundida (*aliased*) com as interacções de três factores. Quanto maior é a resolução de uma experiência, maior é o potencial para uma identificação sem ambiguidade dos efeitos mais importantes e das suas interacções.

A opção pela realização de uma experiência factorial fraccionada deve-se à circunstância de não se poder utilizar muitas placas para ensaio devido às restrições de tempo e, de recursos, que foram impostas pela gerência. Por outro lado, é opinião da maior parte dos autores consultados que, numa fase preliminar, destinada a determinar quais os factores predominantes, não é necessário recorrer a técnicas mais sofisticadas e, mais pesadas, dum ponto de vista da utilização de recursos (Messina, 1999 ; Henderson, 2006). Neste caso, apenas foram ensaiadas 16 placas de circuito impresso. Após as indicações dos colaboradores da **Tecnimaster** e do fabricante da pasta de solda, os factores que foram considerados são os seguintes:

- *Viscosidade da Pasta de Solda:*

²¹ Modulador – Desmodulador para a tecnologia GSM.

²² Com experiências de resolução V nenhum factor principal ou combinação de segunda ordem é confundida (*aliased*) com outro factor principal ou combinação de segunda ordem.

Sem dúvida que este é o parâmetro mais crítico. Se a viscosidade for demasiado baixa, a Pasta de Solda perderá a sua forma rectangular quando o *stencil* é levantado, escorrerá e espalhar-se-á, o que, potencialmente, pode conduzir à formação de curto-circuitos. Se, por outro lado, a viscosidade for demasiado elevada, a espátula de espalhamento “*squeegee*” não será capaz de assegurar que todos os furos no *stencil* sejam devidamente preenchidos.

- *Velocidade da espátula:*

É a velocidade com que a espátula percorre o *stencil* em contacto directo. A força, velocidade, rigidez, ângulo de ataque e comprimento da espátula são elementos críticos na impressão da pasta. Uma velocidade mais lenta, não melhora o rendimento da deposição da pasta, enquanto uma velocidade excessiva, provoca que haja falhas de deposição de pasta nalgumas aberturas do *stencil*.

- *Intervalo de limpeza:*

A limpeza do *stencil* antes da utilização é importante, para prevenir que as partículas de poeira e sujidade se introduzam nas soldaduras. Pode ser feita de modo manual ou automático.

- *Pressão da espátula:*

É a força aplicada por unidade de área pela espátula. A força deve ser regulada cuidadosamente, de tal forma que, em cada passagem da espátula, haja uma superfície limpa do *stencil*. Uma força excessiva provoca o vazamento da pasta e, uma força débil, resulta na deposição de pasta de uma forma não uniforme e, no transbordamento, devido à migração da pasta debaixo do *stencil*.

- *Velocidade de separação:*

A velocidade de separação entre o *stencil* e o circuito impresso é importante (Sekharan Gopal, 2006). Uma separação muito rápida, quando se está a imprimir com pistas muito finas, pode resultar na obstrução das aberturas do *stencil*. Resultará também, na formação de resíduos e arestas altas à volta dos depósitos de Pasta de Solda.

As experiências factoriais fraccionadas são úteis na identificação dos factores importantes porque reduzem o número de ensaios a um valor razoável. A análise efectuada, é uma análise de variância ANOVA, que identifica a magnitude do erro experimental e, a significância do modelo, em relação à variabilidade da experiência. O ensaio identifica os factores e, as interacções entre factores que são importantes. Os

efeitos apresentados como mais significativos, representam as variáveis independentes do processo que têm maior influência numa resposta particular do tratamento efectuado. Um efeito principal, define-se, como aquele que, provoca uma alteração na resposta do processo, devido a uma alteração do nível do factor que a provocou. Uma interacção entre dois factores ocorre quando a diferença de resposta entre os níveis de um factor não é a mesma para todos os níveis dos restantes factores.

Os factores mais importantes que foram detectados na experiência realizada, são mostrados, usando um gráfico de Pareto para a altura da Pasta de Solda, um gráfico dos efeitos principais e os gráficos das interacções (fig. 4.10, 4.11, 4,12; pp. 115,116,117).

Na primeira fase do trabalho foi utilizado o Controlo Estatístico do Processo e o cálculo de C_{pk} para verificar se o processo (deposição da pasta de soldar) se encontrava dentro dos limites de especificação e a produzir componentes de boa qualidade. A capacidade é calculada através da relação entre a tolerância da especificação e a amplitude da variação natural do processo. Para este tipo de ensaio é necessário que o processo se encontre controlado e devem ser efectuadas medidas reais das variáveis críticas em diversos pontos do processo produtivo.

A utilização da Concepção de Experiências (DOE) na última fase do trabalho serviu para determinar quais os factores críticos mais importantes e melhorar a sua parametrização. Através da melhoria destes factores pode-se aumentar o desempenho do processo e, eventualmente, atingir níveis próximos do Seis Sigma.

A análise dos resultados do trabalho, feita a seguir, permite verificar o nível de desempenho actual do processo de fabrico de circuitos impressos da empresa **Tecnimaster** e indica pistas que conduzam à sua eventual melhoria. As necessidades de mercado actuais exigem produtos cada vez mais sofisticados. Os circuitos electrónicos tornam-se, por isso, cada vez mais complexos. Por conseguinte, atingir a excelência de qualidade é muito importante na manufactura de circuitos impressos.

IV. RESULTADOS E SUA DISCUSSÃO

4.1. Análise dos Processos da Empresa em Estudo

4.1.1. Técnicas de Soldadura

A empresa em estudo dedica-se, como já foi dito, à concepção e montagem de sistemas electrónicos. Tem, também, uma componente significativa de subcontratação, aceitando montar os componentes e placas de circuito impresso fornecidos por outras entidades. Possui ainda, um departamento dedicado à instalação de sistemas de alarme em edifícios. Os dispositivos utilizados nesta actividade são fabricados por outras empresas, ficando a **Tecnimaster**, com a responsabilidade da integração dos sistemas, da sua montagem e comercialização.

Na função de projecto e concepção, a **Tecnimaster** desenvolve e fabrica sistemas de alarme para a indústria automóvel, equipando diversas marcas de automóveis com estes dispositivos. A sua produção assenta na família de microcontroladores da MICROCHIP, especialmente nas famílias 12F e 16F e, o desenvolvimento é feito, utilizando os sistemas que a própria MICROCHIP disponibiliza. As linguagens utilizadas são o *Assembly* e o C, também disponibilizados por aquele fabricante. Os sistemas de desenvolvimento possuem, além da linguagem propriamente dita, depuradores de erros (*debuggers*), e simuladores, assentes em plataformas integradas de *software* (IDE).

Para a realização de protótipos de circuitos impressos, a **Tecnimaster** utiliza uma pequena fresa CNC²³, com controlo X-Y, que faz a remoção da camada de cobre da placa de circuito impresso de acordo com um programa de CAD para a realização de circuitos impressos, a partir do esquema electrónico teórico. Obviamente, toda a concepção do circuito é feita a partir de computadores pessoais existentes na empresa para o efeito. Acessoriamente, são utilizados *breadboards*²⁴ perfurados para a realização de montagens experimentais. A equipa de projecto é formada por um Engenheiro e um

²³ CNC – Máquina de controlo numérico

²⁴ - Placas com ligações pré-estabelecidas onde é possível fazer montagens experimentais sem ligações permanentes

técnico, havendo outro Engenheiro para a parte produtiva e de gestão. Ao todo, na parte de produção, existem seis pessoas.

A empresa não fabrica circuitos impressos propriamente ditos, porque, no momento, não é economicamente rentável fazê-lo. Assim, pode-se dizer que a sua actividade principal consiste na montagem de circuitos electrónicos, ou seja, na inserção de dispositivos e componentes electrónicos nas placas de circuito impresso e na soldadura dos mesmos dispositivos à placa de suporte. Para isso, dispõe de uma linha de produção, constituída por um conjunto de máquinas, onde se destacam duas máquinas de inserção automática de componentes SMD (*pick and place*), (ver fig. 4.1, p. 96), uma máquina de soldadura por onda (*wave solder*), (ver fig. 2.12, p. 74), e um forno de refluxo (*reflow oven*). Existem, também, dois postos de soldadura manual para soldagem dos componentes TH, um banco de ensaio, para verificação dos alarmes de concepção própria, e uma estação de reprodução e gravação das memórias flash EPROM²⁵ necessárias aos microcontroladores MICROCHIP dos alarmes para viaturas.

Há ainda uma máquina semiautomática de serigrafia (*silk screen*), (ver fig. 2.9, p. 69), e uma manual, para colocação da Pasta de Solda (fig. 2.13, p. 77) nos circuitos a introduzir nas máquinas de soldar. As estações de soldadura manual têm uma dupla função: além da colocação manual dos componentes (TH²⁶) com condutores para furos nos circuitos impressos e da respectiva soldadura, fazem um trabalho de inspecção visual aos circuitos acabados com o auxílio de lupas para verificação de defeitos. No caso da sua existência, tentam fazer a sua correcção através de soldadura manual. Também executam ensaios funcionais de circuitos acabados, quando tal é possível, e o cliente final disponibiliza meios para a sua efectivação.

A obtenção de componentes é feita a partir de fornecedores especializados, tais como a *Farnell*, a *RS Components* e fornecedores asiáticos, dependendo a escolha dos custos de aquisição, prazos de entrega e quantidades necessárias, tratando-se de produção própria da **Tecnimaster**. No caso de subcontratação, é da responsabilidade da entidade contratante o seu fornecimento, se nada em contrário for especificado. O modelo de subcontratação e a selecção da cadeia de fornecimento (*supply chain*), atende aos seguintes princípios: o tipo de clientes com que a empresa opera, as expectativas destes

²⁵ - *Electronic Programmable Read Only Memory*

²⁶ - *Through Hole*

quanto a custo, qualidade, fiabilidade, ciclo de vida, apoio após venda e velocidade de entrega. Estes parâmetros são essenciais na selecção dos fornecedores que estão focados nestas questões e que podem estar a fornecer empresas congéneres.

O processo de montagem de circuitos impressos é composto essencialmente por duas fases: (a) colocação dos componentes (resistências e condensadores, entre outros), no substrato e (b) soldar estes componentes no lugar respectivo. Isto resume o processo de soldadura manual, mas quase todas as operações industriais são, de facto, mais complexas. O processo de montagem com várias etapas fornece a versatilidade necessária para incorporar componentes com diferentes tipos de encapsulamento e de substrato e, ainda, acomodar diferentes volumes de produção, de forma a atingir os níveis prescritos de defeitos e de fiabilidade. Pode-se resumir o processo de montagem às seguintes actividades:

1. Preparação dos componentes e das superfícies dos substratos a serem soldados.
2. Aplicação do fluxo e da solda.
3. Derreter a solda para formação da junta de soldadura.
4. Limpeza posterior do conjunto.
5. Inspeção e teste do circuito.



Figura 4. 1 – Máquina de Inserção SMD

Algumas destas actividades podem ser combinadas ou eliminadas, dependendo do tipo de produto a tratar. O processo de montagem pode ser inserido em três categorias que têm a ver com o tipo de componente a ser montado:

1. Tecnologia TH (*Through-Hole*)

2. Tecnologia SMD (Montagem de Superfície)
3. Mista (mistura das duas no mesmo circuito)

É importante recordar que a tecnologia TH e os seus processos de montagem permanecem uma tecnologia crítica na indústria electrónica, embora não na dimensão que tinha antes do advento da tecnologia SMD. A tecnologia TH pode ser utilizada porque é o único formato disponível para certo tipo de componentes, especialmente de grande volume, como sejam transformadores, filtros, e dispositivos de grande potência, a generalidade dos quais, requer alguma forma de suporte mecânico. Uma segunda razão para a continuidade da utilização dos componentes TH é de ordem económica. Em certos casos, por exemplo, de pequenos lotes de circuitos pouco complexos, é mais económico usar componentes TH em conjunto com a soldadura manual. Esta tecnologia existe desde o início da indústria electrónica e o grande salto na sua automatização surgiu com o aparecimento da soldadura por onda. A sua principal desvantagem é não permitir circuitos de grande densidade de componentes. Há factores importantes a considerar no projecto de circuitos com tecnologia TH:

- Requisitos de maquinação (furos e tolerâncias, entre outros)
- Furos de referência (para alinhamento manual ou óptico)
- Dimensões dos furos em relação ao diâmetro dos pinos dos componentes
- Dimensões da placa do substrato (comprimento, largura, espessura)
- Tamanho e densidade dos componentes

Entre o furo e o pino do dispositivo nele inserido deve existir uma folga de 0,07 mm a 0,15 mm para permitir que a capilaridade da solda fundida permita o seu escorrimento. Também a folga existente deve considerar a diferença de diâmetros entre pinos dos componentes devido às tolerâncias de fabrico.

A espessura da placa afecta o processo de soldadura. À medida que a espessura aumenta, torna-se mais difícil fornecer a quantidade de calor necessária à fusão da solda e, a superfície de cobre disponível, actua como um dissipador de calor, que pode impedir, ou dificultar, o escorrimento da solda líquida para os furos.

A **Tecnimaster** utiliza um sistema semiautomático de produção por células e lotes (*batch*). Este sistema é caracterizado pelo encaminhamento de lotes de produto entre as diferentes fases do processo de fabrico. As células ou postos de trabalho não estão sempre na proximidade umas das outras, e podem ser inteiramente manuais, semiautomáticas, ou completamente automáticas em termos da fase ou actividade do processo. Os circuitos são manuseados e transportados à mão entre as diferentes fases do processo e entre as diversas máquinas. Este tipo de produção é mais indicado para unidades que montem uma grande variedade de produtos com baixos volumes de produção e, onde se torne evidente, a necessidade de uma grande flexibilidade produtiva.

A tecnologia mais comum de soldadura de tecnologia mista é a soldadura por onda (ver fig. 2.12, p. 74). O circuito, com os componentes já inseridos, é colocado num tapete rolante da máquina, que leva o circuito até ao aplicador de fluxo, depois, ao andar de pré-aquecimento e, por fim, à onda de solda fundida. Curiosamente, um dos pontos mais críticos do processo de soldadura por onda é a aplicação de fluxo. Este, pode ser aplicado por *spray* ou através de um mecanismo de espuma. A onda de solda é criada por bombagem e sai através de um bico perfurado, atingindo uma certa altura, caindo depois, novamente, numa tina. O lado inferior do circuito impresso contacta a onda de solda, permitindo que o fluxo de solda derretida contacte as partes expostas do circuito, bem como, ser introduzida, por capilaridade, nos orifícios dos pinos. A velocidade do tapete transportador e o ângulo de ataque do circuito, ou seja, o ângulo em que o circuito se aproxima da onda, são parâmetros críticos para a minimização dos defeitos que podem surgir no processo de soldadura. Outro parâmetro crítico do processo de soldadura por onda é a própria geometria da onda (fluxo laminar ou turbulento). A fase final do processo de soldadura é a remoção dos resíduos de fluxo do circuito completo.

A tecnologia SMD refere-se a montagens em que os componentes são soldados directamente nas pistas dos circuitos impressos sem necessidade de existência de furos no substrato. A tendência actual é para a miniaturização dos componentes, permitindo maiores densidades de componentes, mas, por outro lado, colocam requisitos mais exigentes à tecnologia. Enquanto a espessura de 1,58 mm era, até há pouco tempo, norma, actualmente, devido à necessidade de circuitos multi-camada, atinge-se 2,29 mm

e, até, 2,54 mm. No caso da **Tecnimaster**, esta empresa só trabalha com circuitos de dupla camada, ou seja, na parte superior e inferior da placa do substrato.

Uma vantagem particular da utilização da tecnologia SMD é tornar os custos de produção mais baratos ao introduzir um maior grau de automatização no processo de montagem (*assembly*). Permite o recurso às pastas de solda, que são uma combinação de fluxo, de solda metálica em pó e de agentes tixotrópicos. E, pode ser aplicada em quantidades altamente controladas, quer em espessura, quer em área, através da utilização de técnicas de serigrafia. As máquinas automáticas de colocação de componentes (*pick and place*), (ver fig. 4.1, p. 96), permitem o manuseamento dos componentes mais miniaturizados, colocando-os, com precisão, nos depósitos da Pasta de Solda. A natureza pegajosa do fluxo da pasta serve para manter os componentes no lugar em que devem ser soldados.

O circuito montado, passa então, através do forno de refluxo, para que a solda se funda. As máquinas responsáveis pelo processo de impressão da pasta (ver fig. 2.13, p. 77), colocação dos componentes e o próprio forno de refluxo, são colocadas em linha. A fase final do processo, a limpeza, pode ser integrada na sequência do processo de montagem.

A tecnologia mista emprega uma combinação da montagem de superfície com componentes TH instalados na mesma placa. A falta de certos tipos de componentes com encapsulamento SMD é quase sempre responsável pela utilização deste tipo de tecnologia híbrida.

Em geral, os componentes SMD são soldados em primeiro lugar na face superior do circuito, utilizando o forno de refluxo. A instalação dos componentes SMD é feita em primeiro lugar porque a instalação de componentes TH interferiria com a colocação da Pasta de Solda no circuito e com o trabalho da máquina de inserção de componentes. Os componentes TH são então soldados à placa, na sua parte inferior. Se os componentes TH forem em grande número, prefere-se utilizar uma máquina de soldadura por onda. Se existirem componentes SMD na face inferior do circuito também podem ser submetidos ao processo de soldadura por onda, mas têm que ser colados previamente à placa, por intermédio de um adesivo. A técnica de soldadura manual pode ser preferível

neste caso, se houver poucos componentes TH, ou, se os componentes SMD existentes na face inferior do circuito, não poderem ser expostos à solda derretida.

A sequência básica do processo de montagem para uma estrutura SMD, é a seguinte: (1) colocação da Pasta de Solda, (2) recolha e colocação dos componentes no circuito e (3) fusão da solda. O processo de montagem complica-se quando há montagem simultânea de componentes TH. Em geral, a montagem manual de componentes SMD não é prática, devido ao seu tamanho diminuto e à grande proximidade dos pinos dos circuitos integrados de alta densidade. A utilização do ferro de soldar para trabalhos de reparação e requalificação, é também, pelas razões agora invocadas, limitada. No entanto, e de forma pontual, este trabalho é feito na **Tecnimaster** para recuperação de defeitos em circuitos. Exige do operador, como é evidente, um alto nível de prática e destreza. São utilizadas, com essa finalidade, estações de soldar apropriadas e, a operação, é executada com recurso a lentes de aumento. Em resumo, as diferentes tecnologias ou processos utilizadas na empresa em análise, são as seguintes:

- 1) Circuito de face simples e montagem de superfície:
 - i) Impressão da Pasta de Solda (ver fig. 2.13, p. 77; fig. 2.9, p. 69)
 - ii) Colocação dos componentes (ver fig. 4.1, p. 96)
 - iii) Fusão da Pasta de Solda (fig. 2.10, p. 70)

- 2) Circuito de dupla face, montagem de superfície apenas:
 - i) Lado inferior, imprimir a pasta
 - ii) Lado inferior, colocar adesivo para os componentes grandes, se necessário
 - iii) Lado inferior, inserir componentes
 - iv) Lado inferior, fundir a Pasta de Solda e endurecer o adesivo

Virar a placa para o outro lado,

 - v) Face superior, imprimir a pasta
 - vi) Face superior, inserir componentes
 - vii) Face superior, fundir a pasta

- 3) Circuito de face dupla, tecnologia mista (com *wave soldering* do lado inferior)
 - i) Lado inferior, colocação de adesivo para os componentes SMD
 - ii) Lado inferior, inserir componentes SMD
 - iii) Lado inferior, endurecer cola

Virar a placa para o outro lado,

- i) Face superior, imprimir pasta
- ii) Face superior, inserir componentes
- iii) Face superior, fundir Pasta de Solda
- iv) Face superior, inserir componentes TH
- v) Soldar por onda os componentes TH e os SMD na face inferior

Um gráfico de fluxo típico para a sequência de montagem de um circuito impresso de dupla face pode ser descrito como segue (Siong-Lin Ho, 2003):

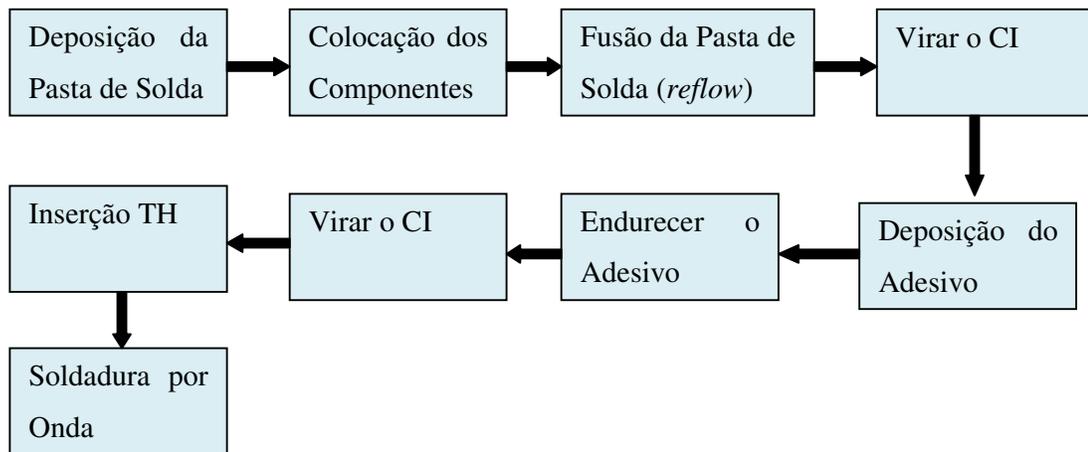


Figura 4. 2 – Fluxograma de Montagem de CI

4.1.2. Mapa de Processos

No sentido de proceder à melhoria do processo de montagem dos circuitos impressos da **Tecnimaster**, foi desenvolvido um projecto de melhoria, de que se anexa o respectivo diagrama simplificado – ver fig. 3.1, p. 90. Numa primeira fase do trabalho, elaboraram-se os mapas dos macros processos e actividades da **Tecnimaster** para se poder ter uma visão de conjunto de todo o processo produtivo desta empresa. Foram detectados essencialmente dois macros processos – um processo de produção e um processo de concepção e desenvolvimento de circuitos e sistemas. O que interessa, no caso em estudo, é o processo de produção e, mais especificamente, o subprocesso de montagem de circuitos impressos por subcontratação.

O mapa de processos envolve a criação de fluxogramas dos sistemas e subsistemas em análise. As saídas de alguns subsistemas podem influenciar as entradas a jusante de outros subsistemas e, o método, é particularmente útil na fase *Define* do ciclo DMAIC, porque, pode identificar os estrangulamentos existentes nos processos, o relacionamento entre os subsistemas, e pode, ainda, permitir identificar as actividades e procedimentos críticos (ver fig. 4.3, fig. 4.4 nas páginas seguintes).

Servirá ainda, para identificar as necessidades dos clientes quanto à qualidade e entrega dos circuitos impressos, seriar a sua importância, bem como as características dos processos dos vários elementos da montagem SMT. Os clientes da montagem dos circuitos impressos são, neste caso, as empresas que subcontratam a **Tecnimaster**.

O processo produtivo tem o seu início no armazém onde se recebem os componentes electrónicos adquiridos e as placas de circuito impresso. Estes bens são adquiridos em fornecedores externos e, o nível das suas existências, é função das necessidades imediatas de produção. De seguida, se o processo produtivo envolve a montagem de circuitos de produção própria da **Tecnimaster** (alarmes auto, por exemplo), é feita a conferência das diferentes espécies de artigos antes do início da montagem, para assegurar que correspondem à lista de material respectiva e, detectar, por inspecção visual, eventuais falhas.

A actividade seguinte envolve o corte e preparação das placas de circuito impresso numa guilhotina, porque estes artigos, sendo produzidos no exterior, vêm habitualmente em placas de fibra de vidro, ou outro tipo de substrato de grandes dimensões, contendo grande número de unidades. O seu traçado é normalmente desenhado numa das faces por serigrafia e, são furados previamente, de modo a permitir a inserção dos componentes com pinos. Os componentes SMD são directamente soldados às pistas de cobre, não necessitando de furação mecânica.

Quando os circuitos incorporam microcontroladores, o que é geralmente o caso da produção própria da **Tecnimaster**, é necessário proceder à gravação das memórias que contêm o programa de execução residente (*firmware*), destinado a operar o circuito nas condições pré-estabelecidas de projecto. Esta actividade é executada com recurso a um computador pessoal e a um gravador de memórias. O computador dispõe, evidentemente, de um programa dedicado a este efeito que descarrega o ficheiro binário para o gravador de memórias. Executada esta operação, o microcontrolador encontra-se

pronto para a inserção na placa de circuito impresso, em conjunto com os outros componentes electrónicos constituintes do respectivo circuito, sejam eles do tipo discreto ou integrado.

A partir deste ponto, como pode ser verificado a partir do respectivo mapa, o processo produtivo é comum para os produtos de produção interna da **Tecnimaster** e para as montagens provenientes de encomendas externas. E, é esta a situação do Estudo de Caso que se propõe tratar. Os componentes foram fornecidos pelo cliente, ficando para a empresa, apenas a tarefa da sua inserção e montagem através de soldadura. Aqui, há uma opção que é preciso ter em linha de conta: se o circuito é constituído unicamente por componentes de montagem de superfície (SMD), ou se também incorpora componentes com pinos (TH). Conforme o tipo de componentes utilizados, assim se recorre ao forno de soldadura por refluxo ou à soldadura por onda.

No caso em estudo, há apenas a utilização de componentes SMD e, por isso, utilizou-se o forno de refluxo. Mas, previamente, houve que colocar os componentes no circuito e mantê-los seguros no lugar a que se destinam. Tais tarefas foram executadas, respectivamente, por uma máquina automática de inserção de componentes e, por um processo de serigrafia, que depositou a pasta de solda nas pistas do circuito. Esta pasta tem duas funções: manter os componentes no lugar durante o processo de fusão e fornecer a solda e, o fluxo, necessários ao processo de soldadura.

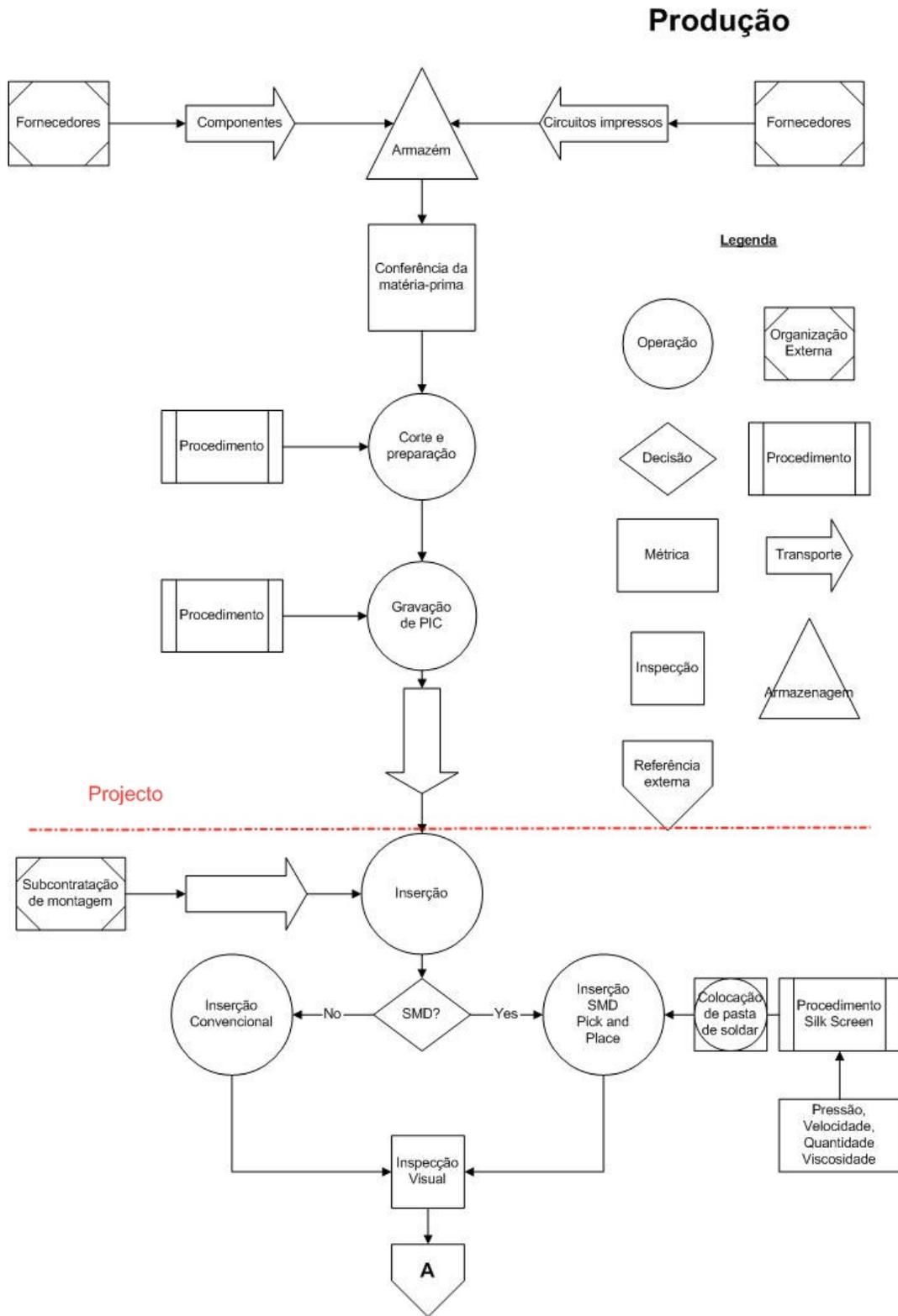


Figura 4.3 – Processo de Produção da Tecnimaster

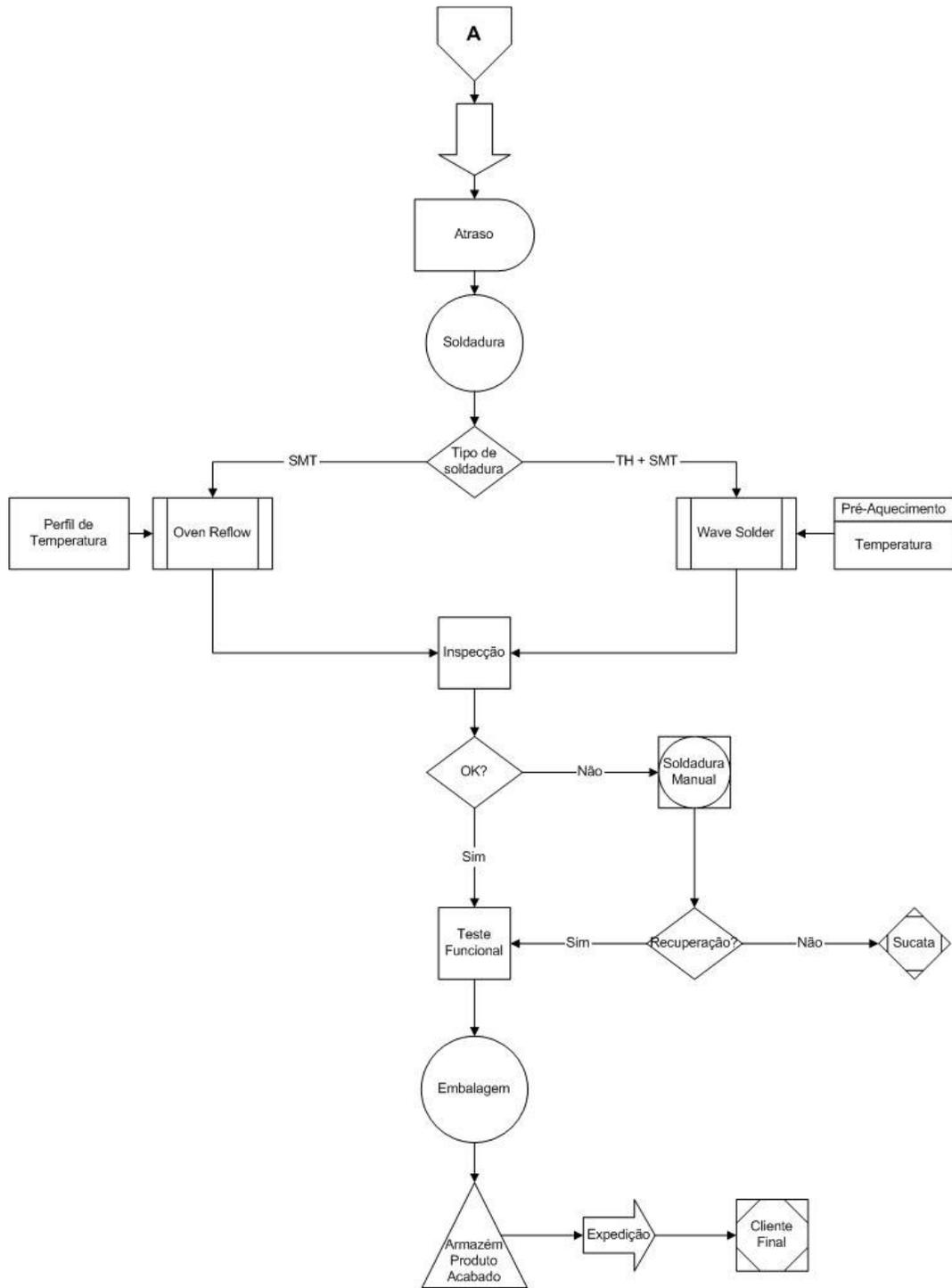


Figura 4.4 – Processo de Produção (Continuação)

O processo de deposição da pasta de soldar, executado por uma máquina específica (ver fig. 2.9, p. 69) tem associado um procedimento algo crítico; a pressão exercida sobre a pasta de solda, a sua viscosidade e quantidade depositada, são factores determinantes na qualidade final das soldaduras. Foi sobre este subprocesso que incidiu particularmente o projecto de melhoria (ver fig. 2.13, p. 77).

Depositada a pasta de solda, é feita uma inspecção visual sumária aos circuitos para detectar possíveis anomalias. E estes, são inseridos, de seguida, no forno de soldadura. O forno de soldadura tem um procedimento associado que pretende respeitar o perfil térmico requerido, que tem de ser escrupulosamente respeitado. Esta condição tem a ver com o tipo de pasta de solda utilizado. As condições especificadas são determinadas pelo fabricante da pasta de solda. O desrespeito do perfil térmico tem normalmente efeitos desastrosos na qualidade das soldaduras.

4.2. O QFD de Melhoria

As características críticas do processo foram integradas com os requisitos do cliente, através da construção de uma matriz de inter-relações de um QFD. Esta ferramenta relaciona os requisitos do cliente, com as entradas e saídas do processo de fabrico. Os requisitos do cliente foram afectados de uma ponderação de 1 a 10, conforme a importância que lhes foi atribuída. A produção identificou, de seguida, as características do processo de montagem e, foi gerada uma matriz de relações, que compatibiliza as necessidades do cliente com as características do processo, em termos de quatro níveis (forte, médio, fraco ou nenhum). A avaliação desta relação é qualitativa e, foi ponderada, utilizando uma escala de 1 a 5, sendo o algarismo maior o indicador de maior importância. O resultado final é obtido pela soma da combinação linear das colunas da matriz. O valor mais elevado é aquele que deve ser levado em consideração em primeiro lugar, porque indica, qual é a fase do processo mais importante para satisfazer as necessidades dos clientes. Este, será o elemento a focar para reduzir os defeitos do processo, ou, a sua variação. O resultado do QFD mostrou, claramente, que, os esforços de melhoria deviam ser dirigidos para o processo de serigrafia e colocação da pasta de solda, antes de qualquer outro, para aumentar a satisfação do cliente final.

A título exemplificativo, o resultado obtido para o processo de serigrafia, responsável pela deposição da pasta de solda, foi calculado da seguinte forma (ver fig. 4.5):

$$5 \times 9 + 5 \times 10 + 5 \times 7 + 3 \times 6 + 1 \times 5 = 153$$

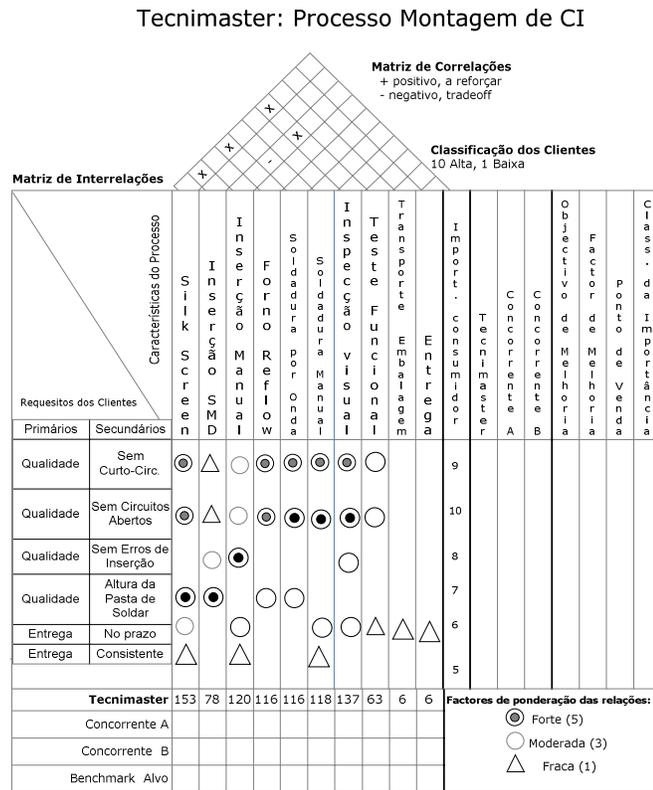


Figura 4.5 – QFD de Melhoria

4.3. Cálculo da Capacidade do Processo

De acordo com o diagrama estabelecido, foi necessário confirmar o tipo de distribuição estatística dos defeitos surgidos no processo de montagem dos circuitos impressos e calcular a capacidade geral do processo respectivo. Recorreu-se, para isso, ao MINITAB e foi realizada uma carta de controlo c. Foi recolhida uma amostra de 100 unidades (10% da encomenda) e, foram constituídos 20 subgrupos, de 5 unidades cada, recolhidos ao acaso na linha de produção, em instantes diferentes, para garantir a sua aleatoriedade. Como pode ser verificado da observação da fig. 4.6, verifica-se que, a distribuição dos dados segue o modelo de Poisson e, a carta de controlo, não apresenta evidência de que alguma causa especial afecte o processo.

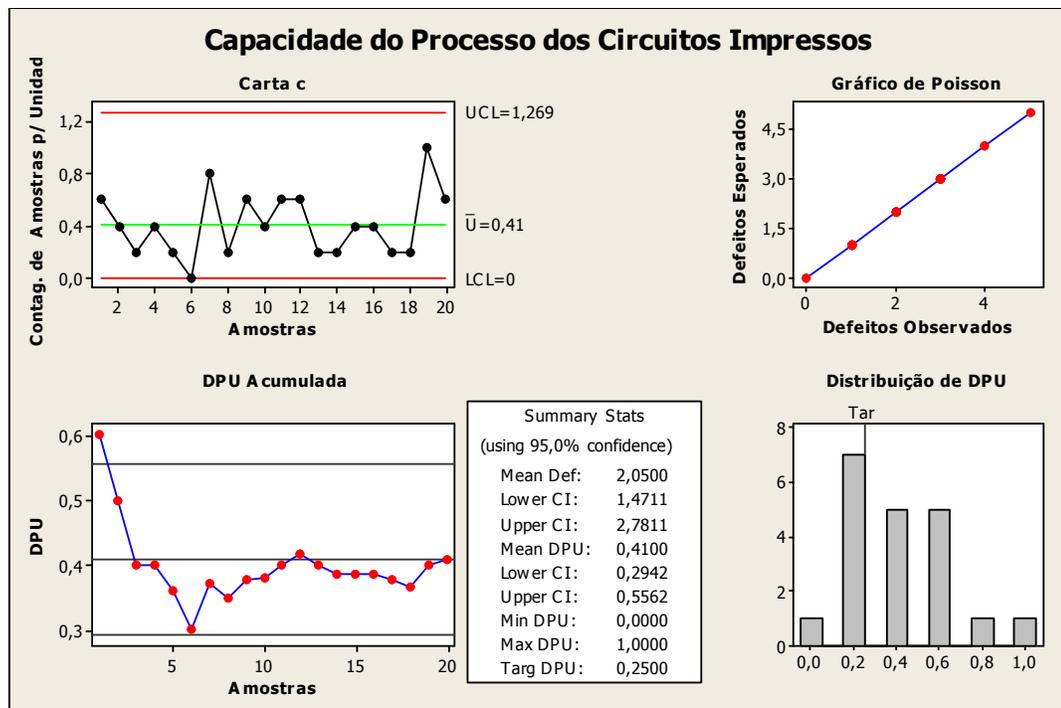


Figura 4. 6 – Capacidade do Processo Principal de Montagem dos CI

O histograma, apresenta a distribuição por subgrupos dos defeitos. Calculou-se a capacidade Sigma do processo, partindo do pressuposto que, cada componente, tem 2,5 oportunidades de falha, de acordo com os dados para este tipo de indústria (Shina, 2002).

Ora, no circuito em análise, segundo a lista de material respectiva (ver anexo, p. 131), existem 73 componentes SMD, o que dá um total de oportunidades de falha de: $73 \times 2,5 = 182,5$ por circuito e, um número de defeitos por milhão de oportunidades, $DPMO = 41/18250 \times 10^6 = 2247$, uma vez que, há 41 defeitos na amostra de 100 circuitos. Tem-se, então, um número de defeitos por unidade, $DPU = 0,00225$. O nível Sigma correspondente, do processo de montagem de circuitos impressos, é cerca de 4,3 entrando em linha de conta com o desvio da média de $1,5 \sigma$ – consultar a tabela em anexo, p. 130 -, o que é bastante razoável para este tipo de actividade e abona em favor da qualidade do processo produtivo da **Tecnimaster**.

Para o cálculo do rendimento total do processo, obtém-se:

$RTY = (1 - DPU) \times 100 = \left(1 - \frac{41}{2,5 \times 73 \times 100}\right) \times 100 = 99,77 \%$, o que é também um rendimento aceitável e, compaginável, com este tipo de actividade.

Será interessante, agora, verificar quais são os contributos das diversas operações e, tentar melhorar, aquelas que demonstrarem possuir pior desempenho, para assim aumentar o rendimento do conjunto. Nesse sentido e, analisando os defeitos por tipo, procurou-se, através de uma análise de Pareto, verificar quais eram as causas mais importantes para o aparecimento de defeitos, para assim se poder agir, de forma selectiva, na tentativa da sua eliminação.

Com essa finalidade, os defeitos foram catalogados em classes e ordenados por ordem decrescente de importância. Foram considerados os seguintes tipos de defeitos: (1) circuitos abertos, (2) curto circuitos, (3) tipo de componente trocado, (4) componente incorrectamente inserido (polaridade trocada), (5) valor errado, (6) pinos dobrados, (7) solda fria, (8) componente com o invólucro danificado.

Pelo que se pode constatar da leitura do gráfico (ver fig. 4.7, p. 111) a maior parte das falhas têm a ver com circuitos abertos e curto-circuitos, o que está de acordo com as percentagens habituais nesta indústria (cerca de 65% dos defeitos podem ser identificados com estes dois factores). Os outros tipos de defeitos são praticamente inexistentes, o que não espanta, tratando-se duma placa de SMD montada por inserção automática.

Atendendo à tipologia de defeitos, muito provavelmente, o problema e a oportunidade de melhoria residem no processo de serigrafia (*silk-screen*), problema já estudado, por exemplo, por Tong et al. (2004). Estes autores, juntamente com Lasky (2003), produziram trabalhos em revistas da especialidade a tratar desta matéria. De facto, segundo refere este último autor, muitos estudos indicam que mais de 60% dos defeitos em linhas de montagem SMT²⁷ podem ser atribuídos à Pasta de Solda e ao processo de serigrafia necessário para a sua colocação. Sekharan (2006), confirma estes valores. Acrescenta que, para o processo de *reflow*, prevêem-se cerca de 15% de defeitos. Refere ainda que, a Pasta de Solda representa, em percentagem de despesa do produto acabado, apenas 0,05 % do valor do produto final, mas nenhum factor afecta mais o resultado final do que este artigo.

Dada a importância da Pasta de Solda para a qualidade do produto final, faz todo o sentido avaliar o processo da sua colocação de uma forma sistemática. As suas características de fusão, resistência superficial de isolamento, fluidez, tensão superficial, capacidade de impressão e, capacidade de adesão, podem constituir um conjunto mínimo de métricas de desempenho a considerar. A limpeza e possibilidade de teste também podem ser avaliadas.

Tong et al. (2004), confirmam que, o processo de serigrafia (*silk screen*), é o processo mais crítico que pode afectar a qualidade dos circuitos impressos. Sem controlo apropriado do processo de colocação de pasta, surgem problemas comuns de impressão, tais como, o estabelecimento de pontes de solda entre pistas, nódoas de pasta, curto-circuitos e, podem ocorrer, enganos de colocação. Os processos de maior importância para a montagem de componentes SMD são a colocação de pasta (*solder screen*), a colocação de componentes e a soldadura por refusão (*solder reflow*) (Tong et al., 2004).

²⁷ *Surface Mount Technology*

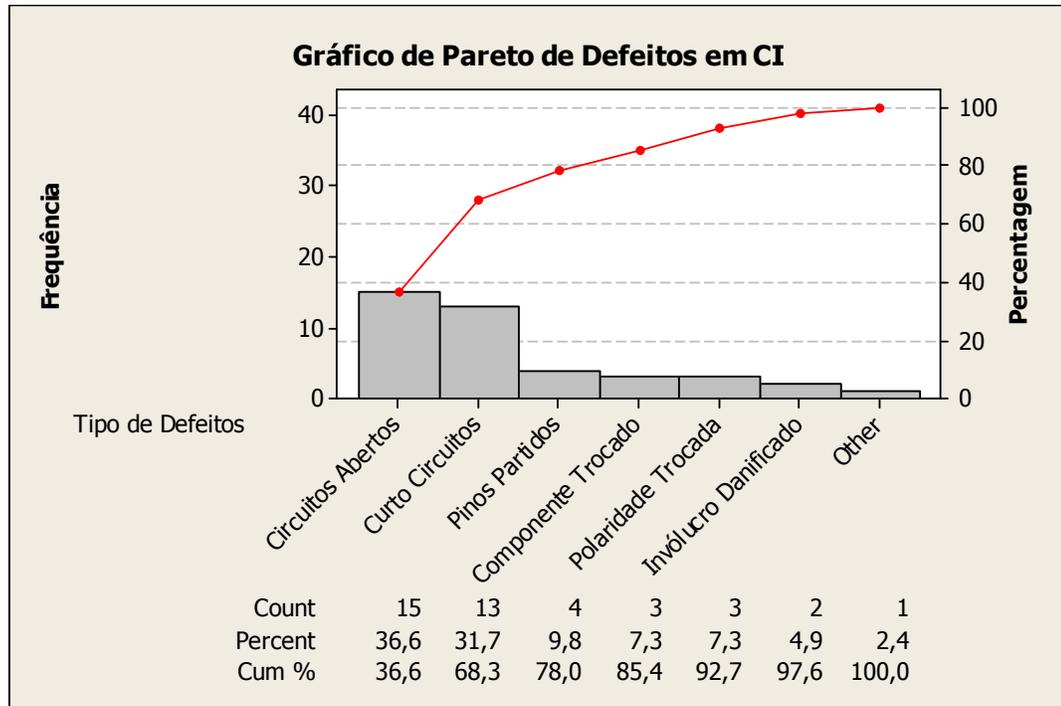


Figura 4.7 – Gráfico de Pareto dos Defeitos nos CI

Um tijolo (“*brick*”) de Pasta de Solda com boa consistência de volume, é, certamente, o melhor indicador de grande rendimento da linha de produção. Uma grande quantidade de Pasta de Solda no “tijolo” que é impresso, pode resultar na formação de curto-circuitos, enquanto pouco volume, pode ter, como consequência, a formação de circuitos abertos (Lasky, 2003). Ainda segundo outro autor, a consistência do volume da pasta é a métrica mais importante, embora este factor seja o de maior variação entre as diferentes propostas de marcas de pastas de soldar (Messina, 1999).

Esta sensibilidade é comum aos colaboradores da **Tecnimaster** e, vem confirmar, o teste inicial. O processo de impressão da pasta é um processo de manufactura que transfere a Pasta de Solda para a pista metálica (“*pad*”) do circuito impresso. O método de aplicação, consiste na impressão da pasta por um método serigráfico, utilizando um *stencil* metálico. A máquina utilizada pela **Tecnimaster** é do tipo semi-automático e, incorpora uma espátula, designada por “*squeegee*”. Durante o processo de impressão o circuito a tratar é colocado num esquadro de fixação e, a Pasta de Solda, é colocada manualmente num *stencil* antes de se proceder à impressão. A espátula (“*squeegee*”), é então accionada num movimento transversal e, pressiona a Pasta de Solda, através dos

orifícios do *stencil*, transferindo-se esta, para os pontos do circuito a soldar (ver fig. 2.13, p.77).

Neste processo, o volume (altura) da Pasta de Solda é o factor mais importante e, necessita, ser controlado cuidadosamente (Tong et al., 2004). Isto, porque, solda a menos pode provocar a formação de circuitos abertos e, uma quantidade excessiva de solda, pode provocar a formação de pontes entre os condutores (pistas) do circuito impresso, nos processos seguintes. Como consequência, a altura da solda é uma característica crítica para a qualidade (CTQ) que necessita ser controlada de forma muito precisa. Como já foi visto, embora a capacidade geral do processo de montagem de circuitos impressos esteja a níveis próximos de 4σ , o que é habitual nas empresas sem grandes preocupações com o processo de controlo da qualidade, acreditou-se que, seria possível, melhorar este índice. Foi construído um diagrama de causa e efeito, em conjunto com os colaboradores da **Tecnimaster**, que permitiu indagar melhor quais as causas dos defeitos que aconteceram nos circuitos (ver fig.4.8).

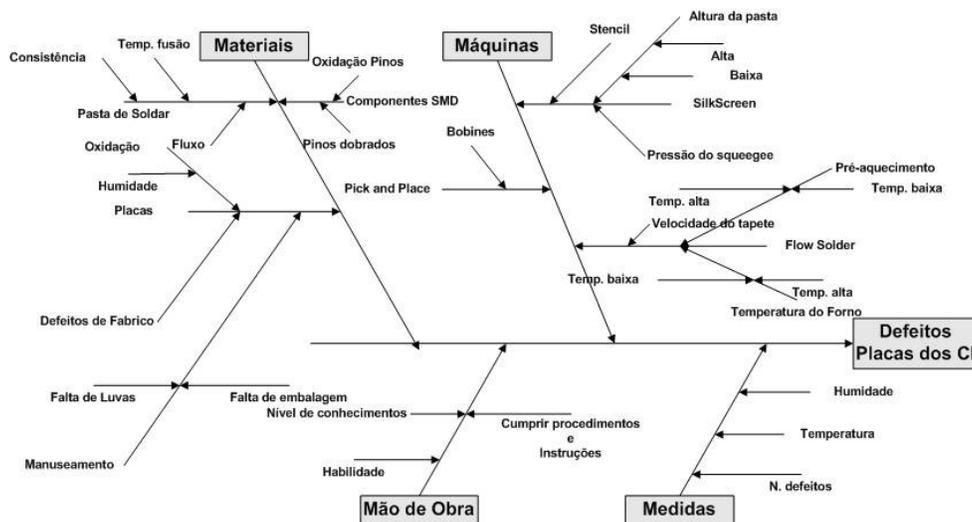


Figura 4. 8 – Diagrama de Causa e Efeito

Da sua análise e interpretação pode-se inferir que, havia fortes suspeitas de que a maior parte dos problemas com as soldaduras SMD derivavam do processo de colocação de

pasta. Por isso, este processo foi estudado em particular. Com esse propósito, foi feito um gráfico de controlo da média e da amplitude da altura da pasta. De seguida, foi calculada a respectiva capacidade do processo, atendendo aos limites das especificações (USL =160 µm; LSL = 140 µm; valor alvo = 150 µm) recomendados pelo fabricante da Pasta de Solda (*Multicore*) e seguindo as indicações fornecidas pela Engenharia de Processo da **Tecnimaster**, em conformidade com o proposto por Messina (1999).

Nesse sentido, foi também calculada a capacidade deste subprocesso, utilizando como recurso, mais uma vez, o MINITAB. Como a variação do processo em relação ao valor nominal é pequena (processo centrado e simétrico) (Shina, 2002), vem que:

$$C_p = \frac{\pm SL}{6\sigma} \Rightarrow \sigma = (1,11 \times 6) \div 2 = 3,33 \quad (\text{ver fig. 4.9})$$

Daqui se pode concluir que, o nível sigma do subprocesso de colocação de pasta de solda se encontra abaixo do nível do conjunto do processo de montagem geral, obtido a partir da amostra de 100 unidades (4,3σ). Este facto prejudica, portanto, o rendimento (*yield*) do conjunto, uma vez que, o rendimento final RTY, é o produto dos rendimentos parciais. É uma oportunidade para melhoria que se irá desenvolver a seguir.

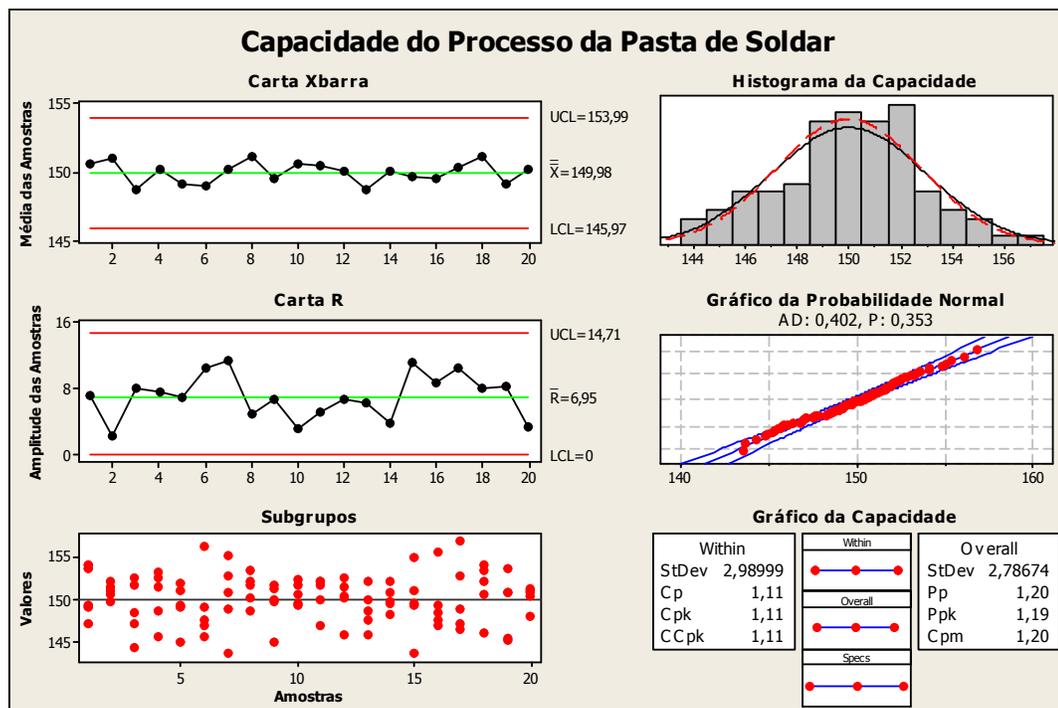


Figura 4. 9 – Capacidade do Subprocesso do Silk Screen

No processo serigráfico, a altura da Pasta de Solda transferida para a placa do circuito impresso é o factor crítico que necessita ser controlado cuidadosamente (Tong et al., 2004; Craig, 2004). A capacidade actual (C_{pk}) deste processo tem o valor de 1,11 (ver fig. 4.9), o que está abaixo do nível de 4,3 sigma (1,43 com deslocamento da média). E, como pode ser constatado através do histograma da capacidade do processo, há margem para reduzir a variabilidade (dispersão) da altura da Pasta de Solda.

4.4. A Melhoria do Processo

Com o intuito de proceder à melhoria do subprocesso de deposição da pasta de solda isoladamente, foram examinados os factores que podiam ter maior influência na capacidade do processo de impressão. Foram, por isso, levadas a efeito, com o mínimo de ensaios, algumas experiências utilizando DOE, com a finalidade de verificar quais as variáveis do processo com maior impacto no produto final. É evidente que, se houvesse condições para tal, teria que ser levada a cabo, após esta fase de identificação dos factores mais importantes (*screening experiment*), uma outra, mais rigorosa, para determinação e verificação das parametrizações óptimas. Tal não foi possível, devido às condições que nos foram impostas pela própria **Tecnimaster** e, ao tempo escasso, que nos foi concedido para a elaboração deste trabalho.

Foram feitos dezasseis ensaios e, foram utilizados, para cada ensaio, 4 pontos de medida no circuito impresso para a altura da Pasta de Solda. No total, foram recolhidos 64 pontos de medida da altura da Pasta de Solda.

	Descrição	Nível 1 (-1)	Nível 2 (+1)
A	Pressão da Espátula	15 bar	25 bar
B	Velocidade de Separação	1 mm/s	5 mm/s
C	Intervalo de Limpeza	5 impressões	10 impressões
D	Velocidade da Espátula	25 mm/s	50 mm/s
E	Viscosidade da Pasta	<150mPa.s	>200 mPa.s

Tabela 5

Os factores e os respectivos níveis estão descritos na Tabela 5, p.114. As condições - experimentais foram as seguintes: temperatura da sala 25° C, humidade 63%. Foi utilizada uma só operadora. O gráfico dos factores principais que influenciam a resposta do processo da altura da pasta de soldar encontra-se na página 117 (ver fig. 4.12). Estes factores provocam a mudança na resposta do processo de deposição da pasta de soldar através da alteração do seu nível.

Através do exame de um gráfico de Pareto, podem-se verificar quais os efeitos mais significativos. A análise de Pareto serve para comparar a magnitude relativa e a significância dos factores principais e, das respectivas interacções, no resultado final (altura da Pasta de Solda) – ver fig. 4.10.

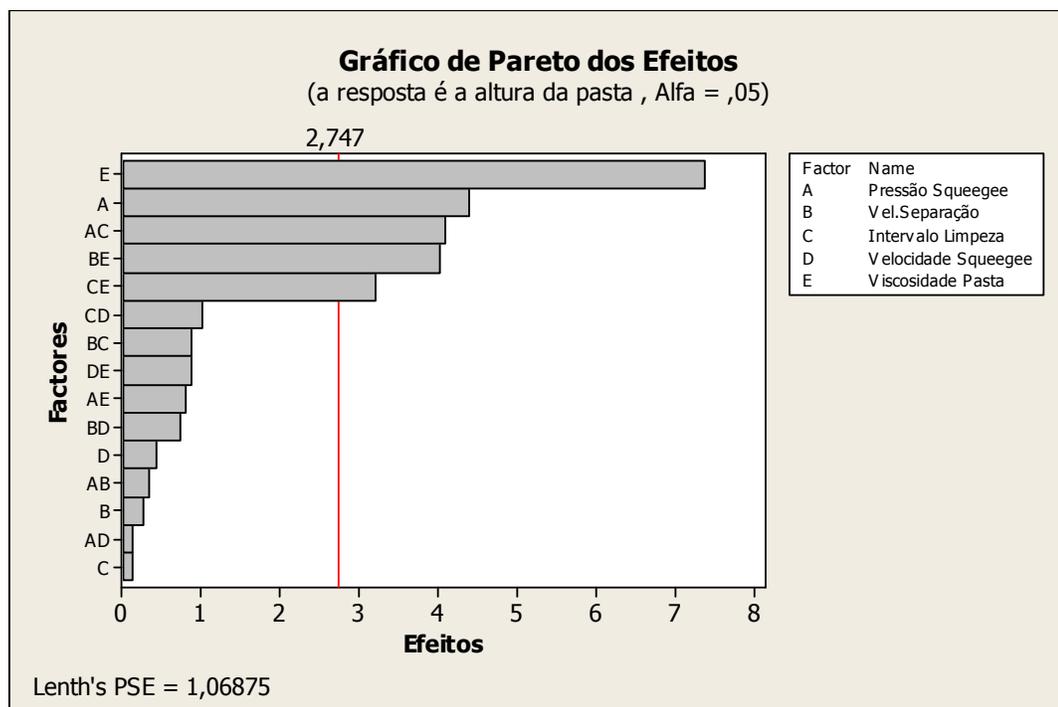


Figura 4.10 – Gráfico de Pareto dos Efeitos (DOE)

O MINITAB dispõe os efeitos por ordem decrescente do valor absoluto dos factores normalizados e desenha uma linha de referência no gráfico. Qualquer efeito que se estenda para além desta linha é considerado significativo ($\leq p; \alpha=0,05$). Os factores dominantes mais importantes são:

Factor E: viscosidade da Pasta de Solda

Factor A: pressão do *squeegee*

Interacção AC: pressão do *squeegee* x intervalo de limpeza

Interacção BE: velocidade de separação x viscosidade da Pasta de Solda

Interacção CE: intervalo de limpeza x viscosidade da Pasta de Solda

Foi construído, em simultâneo, um gráfico das interacções para determinar se dois factores interagem e, o qual o seu efeito na resposta do processo, e comparar as suas contribuições relativas para a mesma – ver fig. 4.11.

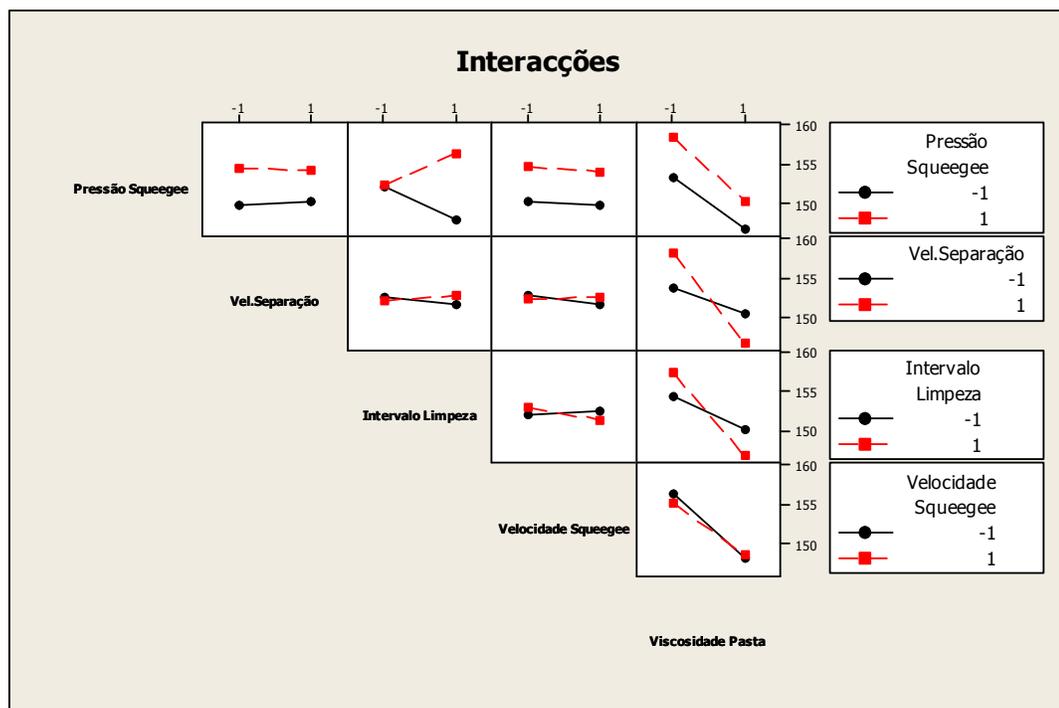


Figura 4.11- Interacções dos Factores (DOE)

A análise de variância realizada para as respostas dos parâmetros, mostrou que os factores escolhidos são estatisticamente significativos para um nível de significância de 0,05. O gráfico de probabilidade normal dos resíduos para cada resposta é satisfatório.

Pode-se definir, numa primeira aproximação, a partir do gráfico dos efeitos principais, a melhor parametrização para a altura da Pasta de Solda. No caso da resposta da altura da pasta, os valores mais baixos para os factores que condicionam o processo de deposição

da pasta de soldar são considerados os melhores. Consultar a este respeito (J.P.C.Tong, F.Tsung, & B.P.C.Yen, 2004).

Por conseguinte, dos dados que foram analisados, pode-se concluir que a parametrização mais favorável para o processo de impressão da Pasta de Solda será, em função dos valores da Tabela 5 e do gráfico da fig. 4.12, a seguinte:

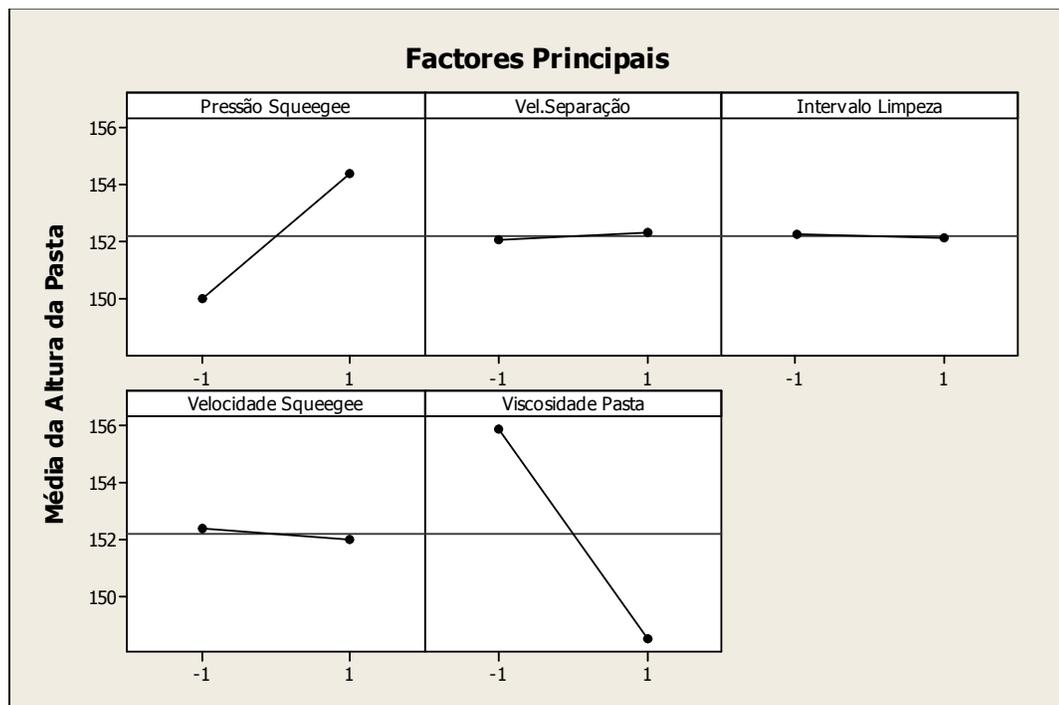


Figura 4.12 – Efeitos Principais (DOE)

- A – Pressão da espátula: 15 bar
- B – Velocidade de separação: 1 mm/s
- C – Intervalo de limpeza: 10 impressões
- D – Velocidade da espátula: 50 mm/s
- E – Viscosidade da Pasta de Solda: > 200 mPa.s

4.5. Discussão dos Resultados

Não foi possível, no entanto, realizar a validação destas conclusões através de experiências mais rigorosas, nem a optimização dos factores. Isto, em virtude do grau de liberdade que nos foi concedido, e por manifesta falta de tempo, para a realização dum projecto desta magnitude. Finalmente, para conclusão do ciclo DMAIC de melhoria, a seguir a esta fase, uma outra, de controlo, deveria ser efectuada para assegurar que as melhorias introduzidas tinham consistência ao longo do tempo. Os factores CTQ deveriam ser monitorizados, de tal forma que, a variação da altura da Pasta de Solda e o nível sigma do processo pudessem ser controlados continuamente. Com mais tempo disponível e, outro tipo de comprometimento, teria sido possível levar a cabo esta fase, com recurso, por exemplo, a cartas de controlo que monitorizassem as melhorias conseguidas na fase *Improve*.

O nível sigma calculado do processo geral de montagem ($4,3 \sigma$) a partir da amostra recolhida é aceitável para uma indústria de qualidade média. É evidente que, este resultado, foi encontrado a partir de uma única amostra e de um único tipo de produto, que não é de produção regular e, portanto, será arriscado generalizá-lo a todo o processo produtivo da **Tecnimaster**. Teria sido interessante, noutra tipo de condições, estender o projecto a outros produtos e recolher maior número de amostras. Contudo, não será demasiado arriscado afirmar que, é possível, melhorar a capacidade geral do processo produtivo da empresa em análise. Pelo que se constatou, o processo de deposição da pasta de solda tem uma capacidade bastante inferior à do processo geral e será este factor o principal responsável pelo abaixamento do nível geral da capacidade. Espera-se, no entanto, que este ensaio tenha servido para sensibilizar a gerência da **Tecnimaster** para a necessidade de alterar esse aspecto.

A finalizar, refira-se que, a capacidade de processo típica de uma placa de circuito impresso montada anda à volta de 50 partes por milhão de defeitos (ppm) para as soldaduras e componentes defeituosos. Uma vez que o circuito médio contém à volta de 2000 soldaduras e 300 componentes, mesmo uma taxa de 50 ppm gera muitos circuitos com defeitos a necessitar de correcção e uma capacidade de processo relativamente baixa (Allen, 2006). Existe portanto, muito espaço para proceder a melhorias de desempenho do processo produtivo da empresa em análise.

V. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Objectivos e Limitações do Trabalho

Este trabalho propunha-se realizar a melhoria dos processos de uma empresa dedicada ao fabrico de sistemas electrónicos e, tinha, como motivação principal, dois tipos de objectivos. O primeiro, era tentar introduzir algumas técnicas do Seis Sigma, sendo essas técnicas e ferramentas implementadas numa pequena empresa, sem grandes recursos humanos e financeiros. O outro, era reduzir a taxa de defeitos do processo de montagem de circuitos impressos. Não se pode dizer que o desafio fosse pequeno, mas foi assumido. O Seis Sigma é uma metodologia de resolução de problemas que reduz custos e aumenta a satisfação do consumidor ao reduzir o desperdício dos processos. Mais especificamente, é um método de resolução de problemas que assenta em dados, medidas e estatísticas para identificar os factores críticos que podem de forma dramática diminuir o desperdício e, os defeitos, enquanto aumentam os resultados previsíveis e a satisfação do consumidor.

O Seis Sigma foi desenvolvido, criado e testado na Motorola, nos anos oitenta. De seguida, outras organizações, tais como a General Electric, adoptaram-no com um êxito sem precedentes. Um conceito fundamental no Seis Sigma, é a noção de processo. Um processo é um conjunto de tarefas repetitivas destinadas a atingir um determinado resultado. Parte da metodologia Seis Sigma consiste em medir um processo em termos de defeitos, entendidos estes como características mensuráveis dos processos, ou das suas saídas, que não se encontram dentro dos limites definidos pelos consumidores, ou seja, não estão conformes com as especificações de fabrico. O nível Sigma de um processo é calculado em termos do número de defeitos, em relação ao número de oportunidades para que estes defeitos se manifestem.

O Seis Sigma procura reduzir a variação nos processos. Basicamente, atinge-se o nível Seis Sigma quando um processo tem apenas 3,4 defeitos por milhão de oportunidades (DMPO). Com certeza que este é um objectivo muito difícil de atingir e, não foi propósito deste trabalho consegui-lo, tanto mais que, se tinha plena consciência das limitações que seriam impostas pela gestão da empresa que generosamente concedeu as facilidades para a sua realização.

De facto, grande parte das organizações trabalha em níveis de qualidade de três ou quatro sigmas, o que se traduz em cerca de 25% da sua receita perdida por efeito de não conformidades ou defeitos existentes nos seus processos. Um dos mitos que acompanha o Seis Sigma, é o de que, se trata de uma metodologia cara, só aplicável em grandes organizações, com vastos recursos. No entanto, a qualidade para uma pequena organização não tem o mesmo significado do que para uma grande. Uma grande empresa, com uma grande variedade de produtos e serviços, pode dar-se ao luxo, pelo menos durante algum tempo, de fornecer aos clientes produtos de qualidade abaixo do desejável e continuar em funcionamento.

No entanto, uma pequena empresa de alta tecnologia não sobrevive no mercado global se não ultrapassar os problemas de qualidade. Se não eliminar rapidamente os defeitos, os clientes procurarão outro fornecedor. Mas, não se consegue medir a qualidade seja do que for, se não se conseguir estabelecer uma base para a sua melhoria. Ou seja, se não se sabe em que ponto está a empresa, não se podem estabelecer metas e objectivos de melhoria. E, se não se consegue medir a qualidade, não se podem avaliar os resultados dos nossos esforços de melhoria. Para isso, é necessário estabelecer métricas e indicadores e, medir os resultados, de acordo com o seu estabelecimento. A monitorização e, a acção atempada às mudanças dos indicadores de negócio, são a chave para uma actividade empresarial consistente que procure o sucesso.

Porém, não se deve medir tudo e de qualquer forma. A medida pela medida, é uma perda de tempo. E, não faz parte da abordagem sistemática que o Seis Sigma visa introduzir. Devem-se medir os processos e as actividades regulares que forneçam informação relevante e, os resultados, devem ter aplicação imediata. Se os dados são fornecidos muito depois de o facto ter acontecido, não se está a gerir o desempenho actual, mas sim, o passado. É necessário, estabelecer e medir a capacidade do processo (a verificação de que o processo cumpre com as necessidades do consumidor) e a avaliação do rendimento (*Yield*) do mesmo.

Tendo-se consciência das limitações de recursos da organização em se que realizou o estudo, não se pretendeu ultrapassar nem a sua cultura, nem as suas possibilidades materiais. Não se tentou, por isso, introduzir qualquer iniciativa que envolvesse a formação e atribuição permanente de recursos humanos da estrutura tradicional do Seis Sigma, tais como os *Champions*, *Black Belts* e *Green Belts*, pois seria estultice fazê-lo,

dada a escassez de recursos humanos da organização e, o carácter eventual da intervenção, bem como o tempo disponível para a realização deste trabalho.

5.2. Conclusões

Para aplicar o Seis Sigma numa empresa pequena, deve-se começar por estabelecer um pequeno projecto, que tenha possibilidade de sucesso, e o máximo de retorno. Esta selecção é, talvez, a componente mais importante de qualquer iniciativa Seis Sigma. Há dois critérios importantes na selecção de um projecto: o esforço requerido e a probabilidade de sucesso. A escolha deve estar subordinada aos factores que são críticos para os clientes da empresa e, que vão de encontro às suas expectativas, o que, normalmente, se traduz em qualidade, custo e tempo de entrega do produto.

Deve-se também, estabelecer um objectivo de projecto e, comunicá-lo claramente, à organização. Para ser efectiva, a declaração do projecto deve ser quantificável e específica. No caso do projecto estabelecido na **Tecnimaster**, foi necessário atender aos condicionalismos derivados dum estudo académico, tolerado, mas não fazendo parte da actividade normal da organização. Foi necessário, por isso, condicioná-lo ao possível e estritamente necessário. Por questões de oportunidade, foi escolhido um projecto de redução de defeitos na linha de montagem da soldadura de componentes de montagem de superfície e, recolhida uma amostra de uma produção subcontratada “*batch*”, para um cliente externo. Foi ainda preciso atender às limitações de tempo existente e, à necessidade, de não perturbar a actividade produtiva em curso.

1. Mesmo assim, julga-se que foram atingidos alguns dos objectivos inicialmente propostos. Foi adoptada a metodologia DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Control*), que é o cerne do Seis Sigma para os projectos de melhoria. Na fase *Define*, foram identificados os problemas no processo escolhido para melhoria, estabeleceram-se as métricas e foi desenvolvido um mapa de processos. As necessidades dos consumidores foram examinadas e, estabelecidos, os parâmetros críticos para a qualidade (CTQ). O projecto seleccionado na **Tecnimaster** foi a melhoria do processo de colocação de Pasta de Solda através da máquina de serigrafia (*solder screen*). As razões para esta escolha derivaram

do facto e, da oportunidade, de se estarem a produzir uma série de circuitos para um cliente externo na altura em que se efectuou a realização deste trabalho e, também, porque as indicações dos colaboradores da empresa apontavam nesse sentido. O facto de haver alguns trabalhos consultados durante a pesquisa bibliográfica efectuada que se debruçaram sobre esta problemática também influenciou decisivamente para a escolha do projecto, vide (Kirzhner, 2005; Tong et al., 2004; Lasky, 2003; Siong-Lin Ho, 2003; Messina, 1999), entre outros.

A voz do consumidor (VOC) foi tratada através de uma ferramenta, numa forma simplificada, designada vulgarmente por “Casa da Qualidade”, dado o seu formato gráfico. Embora esta ferramenta tenha sido desenvolvida originalmente para transferir para o desenvolvimento de novos produtos os requisitos dos clientes, também pode servir, através da sua matriz principal, para traduzir os requisitos do consumidor em necessidades do processo.

É claro que, dada a impossibilidade de serem consultados os clientes da **Tecnimaster** por meio de um inquérito, ou por outra forma adequada, foi necessário ouvir as opiniões da gerência e colaboradores, nesse sentido. Uma vez recolhida a voz dos consumidores, é necessário traduzir como é que esses requisitos se relacionam com o serviço objecto do projecto de melhoria seleccionado. Ou seja, dentro dos requisitos enunciados pelos clientes, é necessário saber quais os críticos para a qualidade do processo. A matriz XY que faz parte do QFD é uma ferramenta adequada para esse efeito. No fundo trata-se de realizar uma função de transferência do tipo $Y = f(X)$ em que os requisitos de entrada, depois de sofrerem uma ponderação de acordo com o ponto de vista dos consumidores, se reflectem nas saídas do processo (Y).

Na fase inicial, foram identificados os problemas com o processo escolhido. Ouvida a voz dos clientes, foram determinados os factores críticos para a qualidade (CTQ). Nesta fase devem ser definidos, tão especificamente quanto possível, aonde e quando e, de que forma, é que o produto falha na obtenção das características críticas (CTQ). Estas serão as oportunidades para melhoria. Foram analisados os dados quantitativos possíveis para se ter uma ideia geral da variação e amplitude dos problemas (*Measure*). Foi necessário, no entanto, determinar quais os **factores críticos** vitais presentes no projecto escolhido e, incidir sobre eles, a acção. Não se podem tratar todos os aspectos do problema num único projecto. O Seis Sigma é cirúrgico. A utilização da análise de

Pareto permitiu focar a atenção nos componentes mais importantes e dirigir para eles a acção correctiva.

Na fase de medida, depois de seleccionada a saída crítica do processo (Y) deve-se definir quais os parâmetros de desempenho que são necessários para a mesma. De seguida, é necessário verificar quais são as variáveis ou factores responsáveis pela resposta do processo, recolher e validar os dados e, calcular, a capacidade do processo (nível sigma). Foi recolhida uma amostra de 100 unidades de circuitos impressos de um conjunto de 1000 unidades e, contados os seus defeitos, através de uma folha de verificação. Estes tinham sido previamente caracterizados e seleccionados através da consulta aos colaboradores e de uma análise de Pareto. A recolha foi efectuada durante uma semana, de forma aleatória, em cada turno de trabalho (20 unidades por dia, 10 de manhã e 10 à tarde).

A capacidade do processo foi calculada a partir de uma carta de controlo c e dos limites de especificação recomendados. Estes, foram estabelecidos de acordo com a opinião dos responsáveis e das recomendações do fabricante do equipamento. A capacidade do processo encontra-se dentro do espectável, e ronda os 4 sigmas, o que é perfeitamente razoável para este tipo de indústria. No entanto, para se poder prosseguir para a fase de análise (*Analyze*) e dar-se seguimento ao trabalho, foi necessário detectar quais os factores ou variáveis (X) que afectavam o problema que se propôs tratar e, que, potencialmente, podiam ser melhorados. Incidiu-se a acção sobre a altura da Pasta de Solda e, procurou-se estabelecer as variáveis que a influenciavam e, sobre as quais, se poderia actuar. As pequenas empresas não têm oportunidade para errar e fazer as coisas segunda vez, quando saem mal. Não têm, nem o tempo nem os recursos para subsidiar as más decisões. Por isso e, dado o tipo de produção por lote efectuada pela **Tecnimaster**, só se realizou o que foi possível e, apenas, uma vez. No entanto, verificou-se que, o processo se encontrava centrado e, a sua variabilidade, embora susceptível de melhoria, não era, de forma nenhuma, desastrosa.

Com essa finalidade, foi feita uma experiência tendente a verificar quais os factores em que se poderia intervir para melhorar a resposta do processo (altura da Pasta de Solda). Os resultados estatisticamente relevantes indicaram dois factores: a viscosidade da Pasta de Solda e a pressão da espátula. A escolha do projecto de melhoria foi baseada em trabalhos anteriores de autores reconhecidos, e, no caso em estudo, as conclusões sobre

a importância relativa das variáveis mais importantes para a resposta do processo coincidem, genericamente, com as dos autores referidos. Por imperativos da própria empresa em escrutínio, não foi possível experimentar com novas parametrizações e, uma vez estabelecida a melhoria do processo, passar-se à fase de controlo das melhorias obtidas, através, por exemplo, de gráficos de controlo.

5.3. Recomendações para Estudos Futuros

Em síntese, considera-se que foram atingidos parte dos objectivos que inicialmente foram propostos. Teria sido possível avançar mais, se o tipo de produção da empresa fosse mais estável e de um único produto. As conclusões a tirar com uma amostra que incluísse vários tipos de produtos obrigariam a um tempo de permanência na empresa mais longo e, a uma alocação de recursos, manifestamente incompatível com a dimensão e estrutura da **Tecnimaster**. Daí a opção por uma amostra de um único produto. Apesar disso, considera-se a experiência positiva e enriquecedora. Serviu para demonstrar que, mesmo numa pequena empresa, é possível, dentro de certos limites e condições, formular e prosseguir com um projecto Seis Sigma.

Os factores CTQ deveriam ter sido monitorizados, ao longo do tempo, de tal forma que, a variação da altura da Pasta de Solda e, o nível sigma do processo, fossem controlados continuamente – fase *Control*. No entanto, com mais tempo e, outro tipo de comprometimento por parte do investigador, teria sido possível levar a cabo esta fase, com recurso, por exemplo, a cartas de controlo que monitorizassem as melhorias que fossem conseguidas na fase *Improve*. Também se poderiam ter executado mais experiências, com a intenção de otimizar os factores críticos para o processo da altura da Pasta de Solda e não ficar apenas pela sua determinação.

Neste trabalho só foi tratada a área produtiva e, não se aflorou a parte de concepção de equipamentos e fornecimento de serviços, que também fazem parte das actividades desenvolvidas e disponibilizadas no mercado pela **Tecnimaster**. Dariam certamente, por si sós, a possibilidade de realização de trabalhos tão longos e pormenorizados como o actual.

Bibliografia

- Allen, T. T. (2006). *Introduction to Engineering Statistics and Six Sigma*. London: Springer-Verlag.
- Antony, J. (2003). *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Augustine A. Stagliano. (2004). *Six Sigma Advanced Tools Pocket Guide*. New York: McGraw-Hill.
- Bass, I. (2007). *Six Sigma Statistics with Excel and Minitab*. New York: McGraw-Hill.
- Basu, R. (2004). *Implementing Quality: A Practical Guide to Tools and Techniques* (1^a ed.). London: Thomson.
- Bill Craig. (Dezembro de 2004). *PennWell*. Obtido em 31 de Julho de 2008, de <http://smt.pennet.com>
- Brady, J. E. (2005). *Six Sigma and the University: Teaching, Research, and Meso-Analysis*. Tese de Doutorado, Ohio State University, Graduate School of the Ohio State University.
- Breyfogle, F. W. (2003). *Implementing Six Sigma* (2^a ed.). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Brown, Jonathan M.; Ensby, Professor Michael H. *Implementation of an Attribute Gage Study at IBM suppliers*. Thesis Proposal, IBM Rochester.
- Brue, G. (2006). *Six Sigma for Small Business*. (J. Calmes, Ed.) Madison: Entrepreneur Press.
- Clyde F. Coombs, J. (2008). *Printed Circuits Handbook* (Sixth Edition ed.). New York: McGraw-Hill.
- Craig Gygi, B. W. (2006). *Six Sigma Workbook for Dummies*. Hoboken: Wiley Publishing, Inc.
- Crosby, P. B. (1995). *Quality Without Tears*. (J. James H. Bessent, Ed.) New York: McGraw-Hill.
- Dale, B. G. (2003). *Managing Quality* (Fourth Edition ed.). Oxford: Blackwell Publishing.
- Deming, W. E. (2000). *Out of The Crisis* (1^a ed.). Cambridge: The MIT Press.

Dogdu, S., D.L.Santos, D., & Dougherty, T. (1997). *Guidelines for Implementing Statistical Process Control in Printed Circuit Board Manufacturing*. paper científico, Binghamton University, Department of Systems Science and Industrial Engineering.

Eyal Dassau,Israel Zadok,Daniel R.Lewin. (2006). Combining Six Sigma with Integrated Design and Control for Yield Enhancement in Bioprocessing. *Ind.Eng.Chem.Res.* , 45, pp. 8299-8309.

Foster, S. T. (2007). *Managing Quality - Integrating the Supply Chain* (3ª ed.). New Jersey: Pearson Prentice Hall.

Gerjan Diepstraten. *Analysing Lead-free Wavesoldering Defects*. Vitronics Soltec, Oosterhout.

Grant, E. L., & Leavenworth, R. S. (1996). *Statistical Quality Control* (7ª ed.). (K. E.Case, & P. M.Wolfe, Edits.) Boston: WCB McGraw-Hill.

Gupta, P. (11 de 08 de 2006). *Quality Digest*. Obtido em 28 de Maio de 2008, de <http://qualitydigest.com>

Hallowell, D. L. (7 de July de 2004). *iSixSigma*. (iSixSigma) Obtido em 10 de Junho de 2008, de <http://software.isixsigma.com/library/content/c040707b.asp>

Hambleton, L. (2008). *Treasure Chest of Six Sigma Growth Methods,Tools, and Best Practices*. Upper Saddle River,NJ: Prentice Hall.

Henderson, G. R. (2006). *Six Sigma Quality Improvement with MINITAB*. Chichester: John Wiley & Sons.

Ilona Kirzhner. (September/October de 2005). Wave Solder Process Improvement. *iSixSigma Magazine* (Melhoria dum processo de Wave Solder), p. 8.

Internet World Stats. (2008). Obtido em 15 de Agosto de 2008, de <http://www.internetworldstats.com>

IPC Task Group. (2000). *Calculation of In Process DPMO and Manufacturing Indices for Printed Board Assemblies*. Northbrook: IPC.

Ishikawa, K. (2002). *Guide to Quality Control* (16ª ed.). (J. P. Ltd, Ed.) Tokyo: Asian Productivity Organization.

J.M.Juran, & Gryna, F. M. (1993). *Quality Planning and Analysis* (3ª ed.). New York: McGraw-Hill.

J.P.C.Tong, F.Tsung, & B.P.C.Yen. (2004). *A DMAIC approach to printed circuit board quality improvement*. The Hong Kong University of Science . London: Springer-Verlag.

Jeff Sauro, E. K. (2005). Make Sense of Usability Metrics: Usability and Six Sigma. *UPA Conference, 2005*, (p. 10).

Juran, J. M., & Godfrey, A. B. (2000). *Juran's Quality Handbook* (5^a ed.). Singapore: McGraw-Hill.

Kevin Linderman, R. G. (2006). Six Sigma: The Role of Goals in improvement teams. *Journal of Operations Management* , pp. 779-790.

Loon Ching Tang, T. N. (Março de 2007). Fortification of Six Sigma : Expanding the DMAIC Toolset. *Quality and Reliability Engineering International* , 23, pp. 3-18.

M.Kumar, J. R. (Junho de 2006). Implementing the Lean framework in a Indian SME: a case study. *Production Planning & Control* , 17, pp. 407-423.

Martin Lennartsson, E. V. (2004). *Evaluation of Possible SIX SIGMA Implementation including DMAIC Project*. Dissertação de Mestrado, Lulea University of Technology, Quality Management Area of Lulea University.

Messina, W. S. (1999). *Statistical Process Control For Surface Mount Technology*. Scottsdale: Data Sleuths.

Michael L. George, D. R. (2005). *The Lean Six Sigma Pocket Toolbook*. New York: McGraw-Hill.

Northwest Analytical. (s.d.). <http://www.nwasoft.com/appnotes/circuit.htm>. Obtido em 29 de May de 2008, de Northwest Analytical: <http://www.nwasoft.com>

Ohno, T. (1997). *O Sistema Toyota de Produção*. (C. Schumacher, Trad.) Porto Alegre: Bookman.

Pande, P. S., Neuman, R. P., & Cavanagh, R. R. (2002). *The Six Sigma Way Fieldbook*. (R. Narramore, Ed.) New York: McGraw-Hill.

Park, S. H. (2003). *SIX SIGMA For Quality and Productivity Promotion*. (A. P. ORGANIZATION, Ed.) Tokyo, Japan.

Pereira,Zuleima & Requeijo, José Gomes(2008). *Qualidade:Planeamento e Controlo Estatístico de Processos*. Lisboa: Edição da FCT da UNL.

- Perez-Wilson, M. (1997). Process Capability Minding Your Cpk. *QCI International* , p. 2.
- Pyzdek, T. (2008). Six Sigma Case Study. *Quality Digest* , p. 1.
- Pyzdek, T. (2008). The 1.5 Sigma Shift. *Quality Digest* , p. 2.
- Pyzdek, T. (2003). *The Six Sigma Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Quentin Brook. (2008). *Six Sigma and Minitab*. QSB Consulting.
- REW. (15 de Fevereiro de 2002). *DPMO - Defects per Million Opportunities*. Obtido em 15 de Maio de 2008, de <http://www.datalyser.com>.
- Ricardo Bañuelas, J. A. (25 de January de 2005). An Application of Six Sigma to Reduce Waste. *QUALITY AND RELIABILITY ENGINEERING INTERNATIONAL* , pp. 553-570.
- Roger G. Schroeder, K. L. (2008). Six Sigma: Definition and Underlying Theory. *Journal of Operations Management* , pp. 536-554.
- Ronald C. Lasky, D. S. (2003). *Six Sigma Techniques for Solder Paste Selection*. Indium Corporation of America.
- Schroeder, R. G. (13 de Junho de 2008). Six Sigma: Definition and underlying theory. *Journal of Operations Management* . (ScienceDirect, Ed.)
- Sekharan Gopal, J. M. (2006). *Optimization of Solder Paste Printing Parameters Using Design Of Experiments*. University Teknologi Malaysia. Skudai: Jurnal Teknologi.
- Shewhart, W. A. (1986). *Statistical Method from the Viewpoint of Quality Control*. New York: Dover Publications, Inc.
- Shina, S. G. (2002). *Six Sigma for Electronic Design and Manufacturing*. (S. Chapman, Ed.) New York: McGraw-Hill.
- Siong-Lin Ho, M. X.-N. (2003). Process Monitoring Strategies for Surface Mount Manufacturing Processes. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* , pp. 95-112.
- Smith, G. M. (2004). *Statistical Process Control and Quality Improvement* (5^a ed.). New Jersey: Pearson Prentice-Hall.
- Strong, R. &. (2004). *Six Sigma Advanced Tools Pocket Guide*. New York: McGraw-Hill.

- Suzanne de Treville, N. M. (2004). *Can We Develop theory around Six Sigma*. Paper científico, HEC - University de Lausanne.
- T.N.Goh, M. (Abril de 2003). Statistical Control of a Six Sigma Process. *Quality Engineering* , 15, pp. 587-592.
- Taylor, F. W. (1998). *The Principles of Scientific Management*. Mineola: Dover Publications, Inc.
- Tim Wright. (01 de February de 2007). A DoE for characterizing solder paste stencil printing and measuring paste bricks by 3-D AOI is described. *Circuits Assembly (DoE)*, p. 9.
- Tino, U. M. (1 de Maio de 2008). *DPMO Analysis Implementation*. Obtido em 15 de Maio de 2008, de <http://circuitsassembly.com>.
- Tongdan Jin, P. W. (2006). *A Pratical MTBF Estimate for PCB Design Considering Component and Non-component Failures*. Paper científico, IEEE.
- Tongdan Jin, Peter Su. (2005). *Minimize System Reliability Based on Six Sigma Criteria Considering Component Operational Uncertainties*. artigo científico.
- Tony Greenfield, A. M. (2007). *Design and Analyze your Experiment with MINITAB*. Abingdon: Hodder Arnold.
- Williams, T. N. (August de 2001). A Modified Six Sigma Approach to Improving the Quality of Harwood Flooring. *Master Thesis for the Master of Science Degree* . Knoxville: The University of Tennessee.
- www.asymtek.com. (s.d.). Obtido em 28 de May de 2008, de www.asymtek.com
- Xingxing Zu, L. D. (8 de Fevereiro de 2008). The Evolving Theory of Quality Management: The Role of Six Sigma. *Journal of Operations Management* , p. 20.
- Yin, R. K. (2003). *Case Study Research - Design and Methods* (3^a ed.). London: SAGE Publications

Anexos

Tabela de Conversão Sigma		
Defeitos por Milhão de Oportunidades	Nível Sigma (Com o desvio de 1,5 σ)*	Cpk aproximado (Nível Sigma / 3) com 1,5 Sigma de desvio*
933200	0	0,000
915450	0,125	0,042
894400	0,25	0,083
869700	0,375	0,125
841300	0,5	0,167
809200	0,625	0,208
773400	0,75	0,250
734050	0,875	0,292
691500	1,000	0,333
645650	1,125	0,375
598700	1,250	0,417
549750	1,375	0,458
500000	1,500	0,500
450250	1,625	0,542
401300	1,750	0,583
354350	1,875	0,625
308500	2,000	0,667
265950	2,125	0,708
226600	2,250	0,750
190800	2,375	0,792
158700	2,500	0,833
130300	2,625	0,875
105600	2,750	0,917
84550	2,875	0,958
66800	3,000	1,000
52100	3,125	1,042
40100	3,250	1,083
30400	3,375	1,125
22700	3,500	1,167
16800	3,625	1,208
12200	3,750	1,250
8800	3,875	1,292
6200	4,000	1,333
4350	4,125	1,375
3000	4,250	1,417
2050	4,375	1,458
1300	4,500	1,500
900	4,625	1,542
600	4,750	1,583
400	4,875	1,625
230	5,000	1,667
180	5,125	1,708
130	5,250	1,750
80	5,375	1,792
30	5,500	1,833
23,4	5,625	1,875
16,7	5,750	1,917
10,1	5,875	1,958
3,4	6,000	2,000

It	Código	Qt	Designação	Un.	Referência	Fabricante-Código	Obs.
01		1	Placa de circuito impresso do Módulo GSM.	UN			
02		2	Calço roscaado a M2x3.	UN	P1 & P2.		
03		2	ERJ6GE Thick Film Chip Resist.-47K 0.1W 5%-SMD R0603	UN	R14 & R12.	PANASONIC-ERJ3GEYJ473V	
04		10	ERJ6GE Thick Film Chip Resist.-4K7 0.1W 5%-SMD R0603	UN	R3, R13, R18, R20, R22, R23, R25, R26, R27 & R29.	PANASONIC-ERJ3GEYJ472V	
05		1	ERJ8EN Precision Thick Film Chip Resist.- 1K00 0.25W 1%-SMD R1206	UN	R2.	PANASONIC-ERJ8ENF1001V	
06		1	ERJ8EN Precision Thick Film Chip Resistors-1K91 0.25W 1%-SMD R1206	UN	R4.	PANASONIC-ERJ8ENF1911V	
07		1	ERJ6GE Thick Film Chip Resist.-10R 1.0W 5%-SMD R2512	UN	R5.	PANASONIC-ERJ1TYJ100V	
08		1	ERJ6GE Thick Film Chip Resist.-33R 1.0W 5%-SMD R2512	UN	R6.	PANASONIC-ERJ1TYJ330V	
09		2	ERJ6GE Thick Film Chip Res.- 100K 0.1W 5%- SMD-R0603	UN	R7 & R8.	PANASONIC-ERJ3GEYJ103V	
10		1	ERJ6GE Thick Film Chip Resist.-22K 0.1W 5%-SMD R0603	UN	R9.	PANASONIC-ERJ3GEYJ22V	
11		8	ERJ6GE Thick Film Chip Resist.- 10K 0.1W 5%- SMD-R0603	UN	R10, R11, R16, R17, R30, R31, R32 & R33.	PANASONIC-ERJ3GEYJ103V	
12		2	ERJ6GE Thick Film Chip Resist.- 1K 0.1W 5%- SMD-R0603.	UN	R14 & R15.	PANASONIC-ERJ3GEYJ102V	
13		1	ERJ6GE Thick Film Chip Res.- 470R 0.1W 5%- SMD-R0603.	UN	R19.	PANASONIC-ERJ3GEYJ470V	
14		1	ERJ6GE Thick Film Chip Resist.-2K7 0.1W 5%- SMD-R0603	UN	R21.	PANASONIC-ERJ3GEYJ272V	
15		2	ERJ6GE Thick Film Chip Res.- 2.2K 0.1W 5%- SMD-R0603.	UN	R24 & R28.	PANASONIC-ERJ3GEYJ222V	
16		3	ERJ6GE Thick Film Chip Res.- 330R 0.1W 5%- SMD-R0603.	UN	R34, R35 & R36.	PANASONIC-ERJ3GEYJ104V	
17		14	X7R Diel. SMT Mult. Cer. Cap.-100nF/50V 5% X7R-SMD-C0805.	UN	C1, C2, C3, C4, C9, C10, C11, C23, C24, C28, C29, C31, C33 & C34.	AVX-08055C104JA172A	
18		2	Solid Tantalum Chip Capacitors-22uF/35V 10% E275-TE-X	UN	C6 & C7.	KEMET-T495X228K035ASE275	
19		1	X7R Diel. SMT Mult. Ceramic Cap.-100nF/50V 5% -C1206	UN	C8.	AVX-12065C104JA172A	
20		1	X7R Diel. SMT Mult. Ceramic Cap.- 1uF/50V 5% -C1206.	UN	C12.	AVX-12065C105JA172A	
21		1	X7R Diel. SMT Mult. Ceramic Cap.- 10nF/50V 5% -C0805.	UN	C13.	AVX-08055C103JA172A	
22		2	SMT Alum. Elec. Capacitors-330uF/35V 20% FK-EEV-FK_G	UN	C14 & C18.	PANASONIC-EEVFK1V331P	
23		2	X7R Diel SMT Mult Ceramic Cap.- 4.7nF/50V 5%- C0805.	UN	C30 & C35	AVX-08055C472JA172A	
24		1	X7R Diellect. SMT Mult. Ceramic Cap.- 10nF/50V 10% -C1206.	UN	C15.	AVX-12065C103KA172A	
25		1	X7R Diellect. SMT Mult. Ceramic Cap.-2uF/216V 5% -C1206.	UN	C40	AVX- 1206YC25JA172A	
26		1	SMT Alum. Elec. Capacitors- 100uF/35V 20%- EEV-FK_F	UN	C5	PANASONIC-EEVFK1V101P	
27		2	X7R Diellect. SMT Mult. Ceramic Cap.-470nF/50V 5%-C1206	UN	C16 & C17.	AVX-12065C474JA172A	
28		2	X7R Diellect. SMT Mult. Ceramic Cap.470pF/50V 5% -C0805.	UN	C19 & C20.	AVX-08055C471JA172A	
29		1	X7R Diellectic SMT Mult. Ceramic Cap.-1nF/50V 5% -C0805.	UN	C21.	AVX-08055C102JA172A	
30		2	X7R Diellectic SMT Mult. Ceramic Cap.-27pF/50V 5% -C0805.	UN	C22 & C25.	AVX-08055C220JA172A	

73 20/09/2014



fastprint 100™

NO CLEAN SOLDER CREAMS

RP11

The Fastprint family of solder creams is designed for high speed printing processes.

Multicore RP11 medium has been formulated as a medium residue level product for printing and reflow in air, where process yield is critical. RP11 solder creams offer excellent open time, greatly extended abandon times and good soldering activity.

- Suitable for fine pitch, high speed stencil printing up to at least 150mm s⁻¹
- Excellent printer open time and tack life
- Extended "between print" abandon time
- High activity to deal with poor component solderability
- Produces safe residues + eliminates the need for cleaning
- Excellent slump resistance

PRODUCT RANGE

Multicore RP11 solder creams may be supplied with powder made from most solder alloys in the Multicore Product Range. The most common alloys used are Sn60, Sn62 and Sn63 conforming to the purity requirements of J-STD-006 and EN 29453. Minimum order requirements may apply to certain alloys and powder particle sizes.

Multicore RP11 medium contains a high activity yet No Clean type of flux and will be suitable for most assembly processes. It is especially suited to meet the demands of high volume production processes using components and boards which have less than the desirable level of solderability. The activity level of Multicore RP11 medium produces greater tolerance to process variations and a lower tendency to poor component wetting.

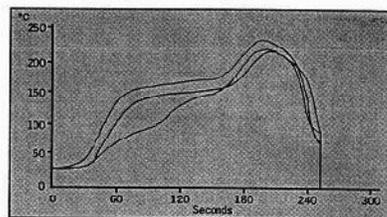
Recommended Metal Content, % in Multicore RP11 Solder Creams For Stencil Printing				
Application	Solder Powder Particle Size			
	Size	45-20µm		
Stencil Printing	Code	Multicore	AGS	
		J-STD-005	Type 3	
Stencil Printing	Metal Content (%)	85	89.5	90
	Viscosity (cP)	650,000	700,000	800,000

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Application: Currently Multicore RP11 solder creams are available for stencil printing down to 16mil (0.4mm) pitch devices with the AGS (Type 3) powder size. Printing at up to 150mm sec⁻¹ can be reliably achieved in production using electroformed or laser cut stencils with a metal blade squeegee (60°). This is due to a unique rheology which ensures that the high shear rate viscosity is relatively low

while the thixotropic index is high enough to ensure excellent definition and slump resistance while maintaining good roll and drop off behaviour. It can be used in volume production down to speeds of 25mm sec⁻¹. If squeegee speeds in excess of 150mm sec⁻¹ are required, the user may find more consistent performance is provided by the Multicore Development: Product MX40. Unlike some creams, high squeegee pressures are not required, making Multicore RP11 particularly useful for second side printing processes. The excellent resistance to drying and consequent avoidance of blocking stencil apertures means that Multicore RP11 yields good quality prints immediately after printer downtimes of greater than 3 hours (in laboratory tests) with no need for conditioning prints. Multicore RP11 solder creams do not require the addition of thinners either before or during use. It is recommended that products shipped in jars should be gently stirred for 15 seconds before use as some slight flux separation may be seen.

Reflow: Any of the available methods of heating to cause reflow may be used including IR, convection, hot belt, vapour phase and laser soldering. It is not practicable to recommend an ideal reflow temperature profile for all situations. However, the following shows example profiles which have given good results in practice.



Cleaning: The residues from Multicore RP11 solder creams may be left on the PCB in many applications since they do not pose a hazard to long term reliability. However, should there be a specific requirement for residue removal, this may be achieved using conventional cleaning processes based on solvents such as Multicore Prozone, or water containing suitable saponifying agents such as Multicore PC85.

Solder Powder: The solder powder for Multicore RP11 solder creams is produced by atomising alloys conforming to the purity requirements of J-STD-006, EN 29453 or other national and international standards where relevant.

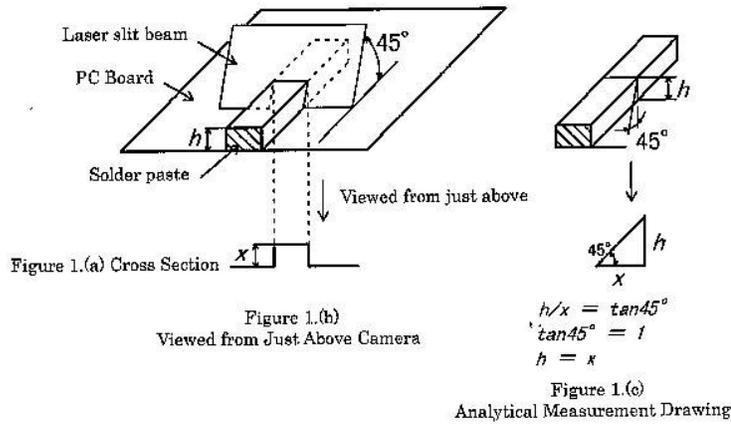
Careful control of production processes ensures that the solder powder is at least 97% spherical (aspect ratio < 1.5) and contains less than the minimum level of contaminants that would adversely affect solder cream performance. A typical maximum oxide contamination level of 80 ppm

III. APPENDICES

III-1 Principle of Measurement

III-1-1 Height measurement

The optical system radiates laser beam, spread in a slit, from above at an angle of 45 degrees. The CCD camera installed just above reads the condition and indicates the height data. This principle is illustrated as shown below, provided the height of solder paste is h .



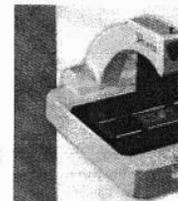
The laser beam emitted from above diagonally is radiated onto the paste surface as shown in Figure 1(a). Figure 1(b) shows the solder paste viewed from the camera installed just above. Figure 1(c) shows the analysis. The height of the solder paste " h " is equal to x , and the displacement viewed by the camera is the height. Therefore, the height may be found by measuring the pixels of the displacement. One pixel of the camera corresponds to $8 \mu\text{m}$, and the magnification is 1:1. Thus, the height is found by multiplying the measured number of pixels by $8 (\mu\text{m})$. Such a height measurement method is called the slit beam cutting method.

PARMI

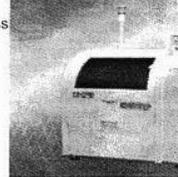
Solder Paste Height Measurement System From Parmi Co. Ltd

Need for Solder Paste Inspection

- Solder Printing is a Primary Source of PCB Assembly Failure
- Proper Inspection Saves PCB Rework Costs
- Rework gets harder as Lead Density increases
- In case of CSP or Flip-Chip, rework can be impossible and it can save the more cost to disuse the entire PCB.
- A cost saving effect 1 : 10 by contrast with back process of Reflow
- A cost saving effect 1 : 50 by contrast with back process of In-Circuit



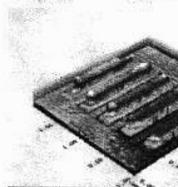
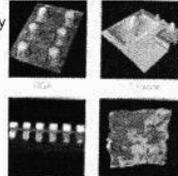
Offline



Inline

Salient Features of the Solder Paste Inspection System

- 3D Visualisation
- A wide range of graphical representation i.e. Mesh, Gray map, pseudo coloring, solid
- 3 Dimensional solder paste coverage representation
- Used for checking BGA, Paste, Pcb Pad, IC Chip lead etc..
- Built on solid stage CCD with 30 frames/sec capture
- Able to accommodate Pcb size upto 330x350 mm
- PIII System Controller
- Win 98 based operating system



For more information / RFQ , contact DVS Sales
Back

