

ANÁLISE DE SOLUÇÕES POTENCIAIS PARA PROBLEMAS DE PREPARAÇÃO DE MÁQUINAS SMT (SURFACE MOUNT TECHNOLOGY)

Gerson Lidak

Marcelo Giroto Rebelato

gerson.lidak@siemens.com

m.giroto@pucpr.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS), Pontifícia Universidade Católica do Paraná – Rua Imaculada Conceição 1155 - 80215-901 – Curitiba – PR - Brasil

Resumo. *O uso da “Tecnologia de Montagem em Superfície” (Surface Mount Technology - SMT) encontra-se em franca expansão na produção de placas de circuito eletrônico em todo o mundo, impulsionada pela necessidade de miniaturização dos produtos eletrônicos. A preparação (set-up) dos equipamentos de composição SMT é ao mesmo tempo um processo delicado, por não permitir erros, e um processo demorado, pois é feito manualmente e exige a fixação de centenas de alimentadores e carretéis de componentes eletrônicos nas máquinas SMT. Desse modo, reduzir o tempo de preparação dos equipamentos de composição SMT é uma condição chave para uma melhoria no fluxo produtivo. Reduzir o índice de erros de fixação dos alimentadores e bobinas de componentes é contribuir para minorar os custos com retrabalho e sucata. A partir disso, este trabalho analisa comparativamente três soluções práticas para tratamento dos problemas citados: 1) solução com alimentadores especializados; 2) solução com computadores portáteis (handheld computers); 3) solução com leitores de código de barras (bar code scanners). Conclui-se, a partir de uma análise realizada por meio de critérios de eficiência e eficácia de set-up estabelecidos para este ambiente de fabricação, que a solução 2 é a mais vantajosa.*

Palavras-Chave: *Produção de placas eletrônicas, Preparação de máquina SMT, Problemas com preparação de máquina SMT.*

1. INTRODUÇÃO

Para os fabricantes de equipamentos eletrônicos, a necessidade de miniaturização dos produtos ofertados impulsionou a criação dos chamados “componentes de montagem em superfície” ou SMD (*Surface Mounted Device*). Os componentes SMD permitem a redução das dimensões das trilhas elétricas sobre as placas de circuito impresso (PCBs – *Printed Circuit Boards*) contribuindo para o adensamento do circuito eletrônico. Quando comparados à antiga tecnologia de componentes eletrônicos fabricados com terminais metálicos, chamada de THT (*Through Hole Technology*), os componentes SMD dissipam menos calor, adaptam-se às técnicas de montagem de PCBs de maior desempenho e reduzem a necessidade de intervenção humana durante a manufatura. Além disso, a ausência de terminais metálicos (ou sua diminuição) diminui o índice de falhas por impacto ou vibração. Os componentes SMD apresentam indutâncias parasitas e capacitivas insignificantes, trazendo benefícios aos projetos que envolvem rádio frequência, e reduzem os custos operacionais de fabricação (SMTA, 2006).

Os componentes SMD são montados sobre as PCBs por meio de máquinas de composição pertencentes à tecnologia chamada “*Surface Mount Technology*” (SMT). São máquinas com alto grau de precisão e automação, gerenciadas por *softwares* que informam a seqüência de montagem, o tipo e a posição de cada componente a ser posicionado sobre a PCB. As máquinas SMT são abastecidas com os componentes SMD por meio de “alimentadores”, ou seja, dispositivos especializados para fixação dos carretéis que contêm os componentes eletrônicos a serem montados sobre a PCB. Os carretéis de componentes são “rolos” ou “bobinas” de fita plástica ou papel que suportam os componentes SMD, espaçadamente. Assim que a máquina apanha um componente para montagem, o carretel avança a fita até que o próximo componente esteja na posição de composição (BROCHONSKI, 1999).

Na manufatura SMT a preparação (*set-up*) das máquinas pode consumir mais de 50% do tempo total de produção (SADIQ e LANDERS, 1991). Há dois motivos básicos para essa lentidão. Por um lado, há sempre um elevado número de alimentadores a serem utilizados nas montagens (MAGAZINE e POLAK, 2002). Por outro lado, os preparadores de máquina têm muita dificuldade em identificar quais carretéis de componentes devem ser fixados em quais alimentadores e suas respectivas posições nas máquinas SMT. As empresas trabalham com centenas de alimentadores e com milhares de componentes com diferentes características elétricas em estoque, sendo eles muito semelhantes entre si. Além disso, os carretéis dificultam a imediata identificação pelo funcionário, pois geralmente o rolo de componentes traz apenas, na parte externa, códigos de barras com diferentes padrões de descrições de *part number* adotadas pelos diversos fabricantes (LIDAK, 2005).

Dessa forma, a lentidão na preparação das máquinas de montagem SMT significa uma redução da eficiência total do processo produtivo (HARMON e PETERSON, 1990). Por outro lado, o *set-up* das máquinas SMT, não permite erros. A colocação errada dos carretéis de componentes (inversão da posição ou troca de valores) significa que a máquina irá montar circuitos que não funcionam, pois os componentes terão sido montados nos lugares errados.

A partir do exposto acima, este artigo se propõe a realizar um estudo com o objetivo de apresentar proposições tecnicamente e economicamente viáveis visando tanto a redução dos erros no processo de *set-up* das máquinas SMT quanto o tempo despendido nesta tarefa.

2. REVISÃO DA LITERATURA SOBRE PREPARAÇÃO DE MÁQUINAS SMT

Jain et al. (1996) apresentam as estratégias mais utilizadas para a redução do número de alimentadores utilizados nas montagens através de modelos matemáticos para montagens que

utilizam componentes similares, contribuindo para a redução do tempo de *set-up*. Ajay e Neville (1998) propõem a melhoria na etapa de *set-up* de linhas de montagem SMT através de um alimentador com sistema vibratório que desloca os componentes um a um para serem capturados pela máquina. Ammons et al. (1988) propõem duas estratégias para o *set-up*: 1) Estratégia de *set-up* único, em que um grupo de máquinas é configurado para produzir uma família de placas usando um único *set-up*; 2) Estratégia de *set-up* múltiplo, utilizando subfamílias de placas para minimizar as trocas de *set-up*. Nesta mesma orientação, Leon e Peters (1998) descrevem a estratégia de manter os componentes mais utilizados em posições fixas nas máquinas por longo período de tempo, evitando perdas de tempo para reconfiguração do *set-up*. Wang et al. (1999) propõem a utilização de algoritmos genéticos para otimização do posicionamento de alimentadores, buscando um maior rendimento do *set-up*. Lucas Filho (2001), por sua vez, apresenta uma crítica aos algoritmos e heurísticas utilizados para resolução de problemas de *set-up* produtivos, observando que tais algoritmos são limitados pelas constantes mudanças na programação de montagens SMT. Embora os métodos de inspeção sejam vitais para a produção SMT, Akiyama (2001) ressalta que o aprimoramento dos processos de inspeção não reduz o número de defeitos gerado por *set-ups* em equipamentos de produção em larga escala. Caso a etapa de preparação não seja corretamente executada, o tempo de reparo continuará aumentando em virtude de componentes errados ou faltantes. O autor afirma que a melhoria da qualidade na manufatura SMT implica num sistema de controle que utiliza conferências e inspeções em etapas críticas, tais como *set-up* de máquina, serigrafia, montagem e solda. Goubergen e Landeghem (2002) defendem que reduções significativas para o tempo de *set-up* podem ser alcançadas através do projeto dos equipamentos produtivos, ou seja, projetistas de equipamentos SMT devem desenvolver equipamentos amigáveis para que não sejam necessárias habilidades especiais na preparação das máquinas. Magnell (2002) descreve o funcionamento de alimentadores especiais que permitem que as máquinas de composição SMT continuem funcionando enquanto os alimentadores são trocados. Tzur e Altman (2004) afirmam que é necessário determinar uma melhor seqüência para a alocação dos alimentadores diminuindo o tempo de *set-up* e propõem um algoritmo para minimizar as trocas de alimentadores e componentes para diferentes placas eletrônicas.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

A pesquisa foi conduzida em cinco fases metodológicas:

1) Identificação do problema – a partir de Lidak (2005), o processo de *set-up* para máquinas SMT foi resumido em oito etapas, conforme mostra a figura 1. O ponto crítico do processo está nas etapas 4 e 5, etapas de fixação dos alimentadores nas máquinas e colocação dos rolos de componentes nos alimentadores. A troca dos alimentadores e o erro na colocação dos componentes dentro destes (inversão de posição dos componentes ou troca de valores), são falhas frequentes;

2) Identificação das causas do problema – as causas para os problemas apontados estão ligadas à fadiga visual dos funcionários na execução das operações repetitivas (LIDAK, 2005). A fadiga visual prejudica a acuracidade necessária no momento de confrontar os números das etiquetas (*part numbers*) aos números do programa de montagem;

3) Identificação dos efeitos das falhas – a troca ou inversão dos componentes acarreta a montagem incorreta dos PCBs. Neste caso, a empresa deve “retrabalhar” as placas uma a uma ou, se o custo do retrabalho for maior que o custo das placas, sucata-las;

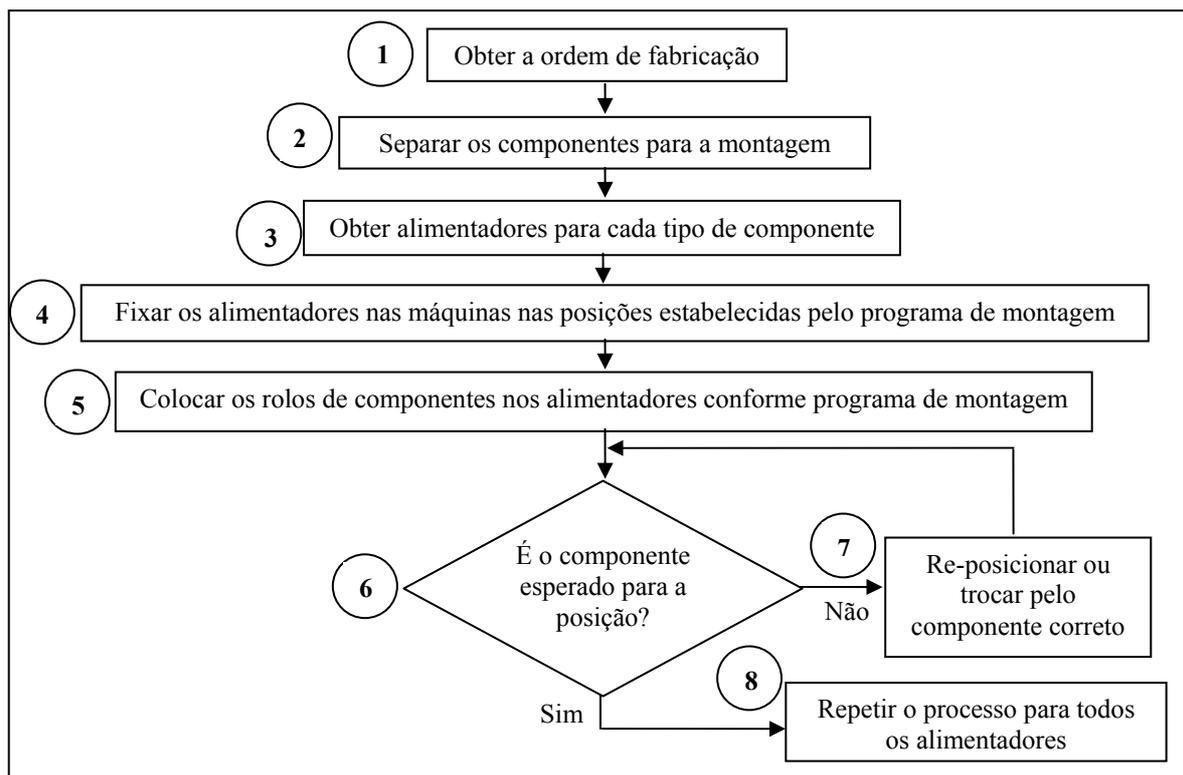


Figura 1: Fluxograma simplificado para o *set-up* de máquina SMT

4) Seleção de soluções potenciais – as soluções aqui apresentadas são baseadas na automação da etapa 6, (conferência de *set-up*). Incrementar a eficácia na conferência do *set-up* significa ganhar tempo e reduzir os erros de montagem. Para isso, três soluções potenciais foram desenvolvidas: 1) conferência de *set-up* por meio de alimentadores especializados; 2) conferência de *set-up* por meio de computadores portáteis distribuídos em rede WLAN (*Wireless Local Area Network*); 3) conferência de *set-up* por meio de leitores de códigos de barras distribuídos em rede LAN (*Local Area Network*);

5) Análise das soluções – as soluções foram analisadas a partir de onze critérios de desempenho para o processo de conferência de *set-up* apresentado por Lidak (2005), desenvolvidos com base nas necessidades dinâmicas deste tipo de fabricação.

4. SOLUÇÕES POTENCIAIS PARA A CONFERÊNCIA DE SET-UP

Com a automação da etapa de conferência de *set-up* busca-se eliminar a conferência visual para os componentes, eliminando os papéis e facilitando o trabalho dos preparadores.

4.1 Alimentadores especializados

Esta solução envolve a utilização de alimentadores especializados integrados com leitores de códigos de barras (solução ofertada pelo mercado, ou seja, já existente). Essa tecnologia possui a limitação de não abranger a variada gama de máquinas SMT e alimentadores existentes atualmente no mercado, já que existem diversas marcas de máquinas SMT que operam com calibres e modelos de alimentadores específicos.

Esta abordagem tecnológica lança mão de alimentadores desenvolvidos especialmente para determinados tipos de componentes e máquinas SMT, ou seja, alimentadores próprios adaptados com leitores de códigos de barras, que por sua vez são associados a um *software* para verificar se os componentes esperados estão fixados nas posições indicadas pelo

programa de montagem. O monitoramento da presença ou falta de componentes, em cada alimentador, é realizado por meio de câmeras digitais e *software* de apoio, tornando possível identificar erros de preparação. Utilizam-se softwares específicos (fornecidos pelo fabricante) que deve receber as informações sobre qual componente, posição, alimentador e máquina SMT está em uso (figura 2) (TRACEXPRESS, 2006).

Essa solução, além de efetuar a conferência em tempo real, oferece a interessante possibilidade de bloquear a máquina SMT caso o componente tenha sido colocado erroneamente. Porém, utiliza *software* proprietário (não “customizável”), o que impossibilita sua integração com outras soluções de *software* existentes, como os sistemas dedicados que possuem os dados de ordens e componentes necessários à montagem. Além disso, é uma solução de alto custo. Os alimentadores com leitores de códigos de barras custam cerca de cinco vezes mais que os alimentadores comuns originais. Para uma empresa de grande porte, que pode utilizar dois ou três mil alimentadores, seria um desembolso vultoso.

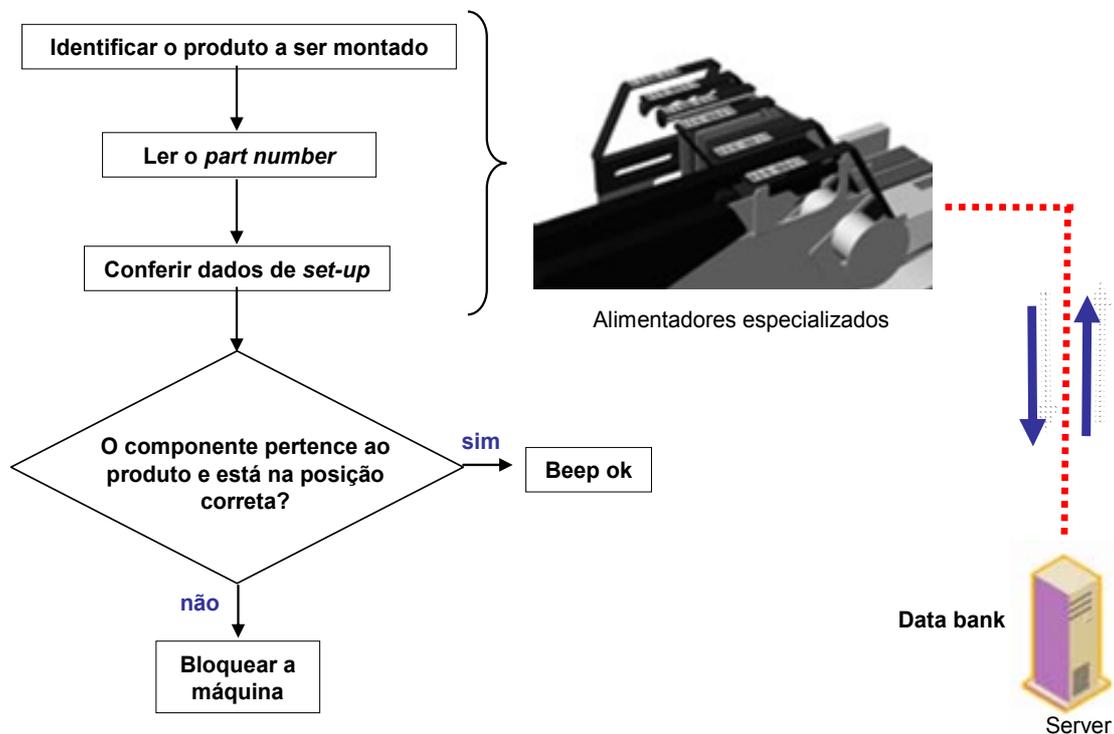


Figura 2 – Conferência de *set-up* com alimentadores especializados

4.2 Computadores portáteis (*handheld computers* ou “*palmtops*”)

Uma rede sem fio ou WLAN é um tipo de rede local que utiliza ondas de rádio de alta frequência para comunicação e transmissão de dados entre os dispositivos móveis e o servidor. Nesta solução, a conferência do *set-up* seria realizada por meio de acesso ao banco de dados corporativo de forma remota através de computadores portáteis (*handheld computers* ou “*palmtops*”) conectados a uma rede WLAN. Esta arquitetura de comunicação requer aplicativos desenvolvidos e customizados para esta plataforma (figura 3).

A composição da WLAN com computadores portáteis em vez de computadores convencionais ou *notebooks* é justificada pela sua maior portabilidade e leveza. Os computadores portáteis escolhidos foram os do tipo que já possuem *interface* para acesso à rede WLAN e leitor de código de barras (*bar code scanner*) incorporado, simplificando a operação para o funcionário preparador.

Dessa forma, para a formação da rede WLAN são necessários apenas os *handheld computers* e os pontos de acesso (*access point*). Esses últimos têm a função de operacionalizar a comunicação (transmissão/recepção de dados via rádio-frequência), permitindo aos funcionários preparadores enviar e receber dados pela rede.

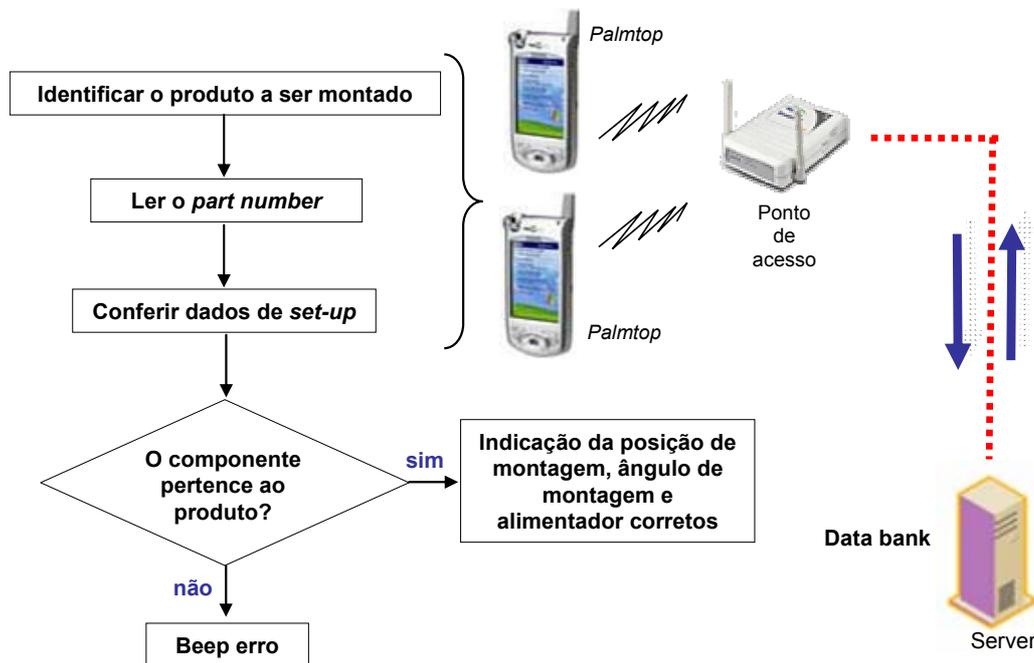


Figura 3 - Conferência de *set-up* com computadores portáteis

Uma rede WLAN pode suportar um grande número de usuários. Para aumentar o número de usuários basta incluir pontos de acesso na rede. Com a inclusão de pontos de acesso sobrepostos, definidos em frequências (canais) diferentes, a rede sem fio pode ser ampliada para acomodar usuários adicionais simultâneos na mesma área.

Esta solução oferece algumas vantagens tais como favorecer a mobilidade dos preparadores na linha de montagem, oferecer uma interface visual para os dados, possibilitar a programação dos computadores portáteis para finalidades adicionais, não requerer estrutura física de cabeamento e possibilitar o acesso simultâneo de diversos dispositivos ao banco de dados de fabricação. Por outro lado, como desvantagem, ressalta-se que o desenvolvimento de programas para os computadores portáteis com acesso a banco de dados corporativos pode exigir licenças especiais de *software*, conforme o tipo de equipamento utilizado. Além disso, em ambientes fabris, que normalmente abrangem grandes áreas e são sujeitos a interferências de rádio-frequência e obstáculos metálicos, vários pontos de acesso (*access point*) devem ser instalados, onerando a implantação.

4.3 Leitores de código de barras (*bar code scanners*)

Uma outra solução pode ser implantada pela utilização de leitores de códigos de barras providos com *interfaces* seriais, conectados à uma rede LAN (*Local Area Network*) convencional. Este tipo de solução compreende a distribuição de vários leitores de códigos de barras ao lado dos diversos equipamentos de montagem SMT, conectados através de cabeamento estruturado a unidades de gerenciamento de múltiplas portas de comunicação serial. Por meio dos leitores de códigos de barras pode-se validar os dados na conferência de *set-up* acessando a base de dados de montagem que se encontra em um servidor (figura 4).

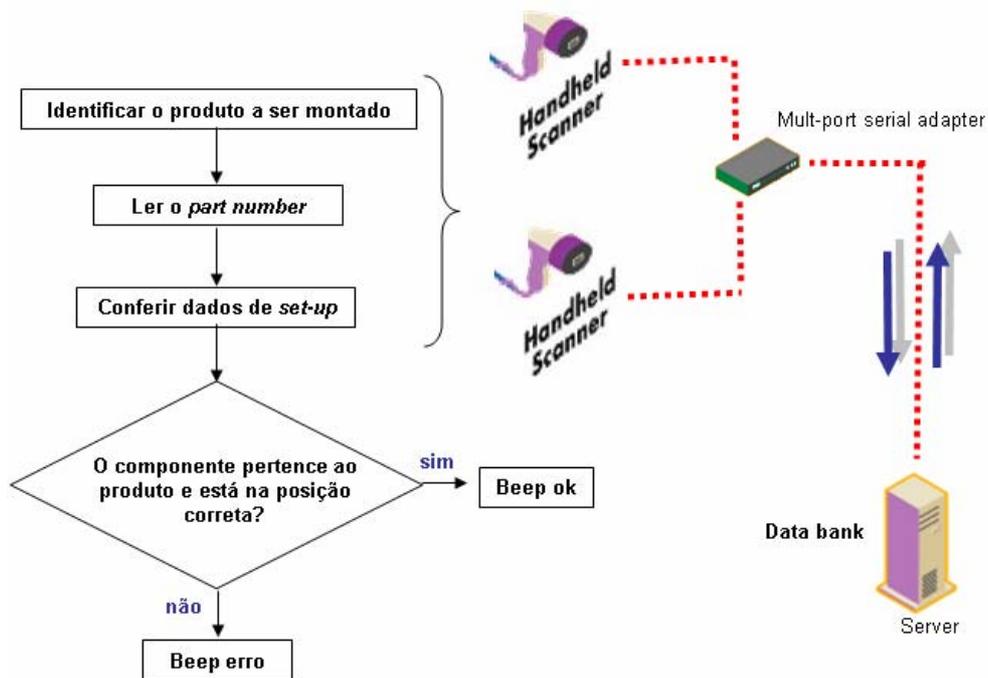


Figura 4 - Conferência de *set-up* com leitores de códigos de barras

Como vantagens, esta solução apresenta custos de implantação mais baixos do que as duas outras apresentadas, a facilidade para manutenções locais dos equipamentos, e a possibilidade de utilização compartilhada para outras aplicações locais que utilizem códigos de barras. Como desvantagens, esta solução demanda a instalação de cabeamento estruturado por toda linha de montagem e exige blindagem metálica nos leitores óticos para a redução das interferências eletromagnéticas.

4. SELEÇÃO DA SOLUÇÃO

Os critérios utilizados para análise das soluções estão apresentados na tabela 1. Estes critérios foram escolhidos com base na flexibilidade exigida pela manufatura SMT, na rapidez da resposta, nos custos, na disponibilidade no mercado, na possibilidade de integração com outros sistemas, na facilidade de manutenção e no potencial de comunicação oferecido pela *interface* com o funcionário usuário.

Tabela 1 - Critérios utilizados para análise das soluções

Critério	Significado
Acesso <i>on-line</i>	Capacidade de acessar, <i>on-line</i> , as informações necessárias ao <i>set-up</i>
Interfaces visuais e sonoras	Facilidades visuais e sonoras do dispositivo para conferência de <i>set-up</i>
Capacidade de programação	Capacidade de programação dos dispositivos para novas necessidades, possibilitando também compartilhar a sua utilização em outras finalidades
Interrupção de produção	Capacidade de bloquear o equipamento SMT quando houver componentes erroneamente abastecidos
Expansibilidade	Capacidade de integração da solução com outras soluções existentes, tais como sistemas de gerenciamento de ordens e banco de dados de componentes
Custo total	Custo total para compra e implantação da solução

Mudanças de <i>layout</i>	Facilidade proporcionada no momento de realizar mudanças no <i>layout</i> da área de montagem
Mobilidade	Grau de mobilidade para utilização na linha de montagem
Identificação do status atual do <i>set-up</i>	Possibilidade de identificação do <i>status</i> instantâneo da preparação (importante no momento da troca de turnos dos preparadores)
Facilidade de substituição	Facilidade de rápida substituição da unidade coletora de dados se esta falhar
Disponibilidade no mercado	Disponibilidade dos equipamentos no mercado para a seleção desenvolvida

A partir da definição dos critérios de análise das soluções realizou-se uma ponderação subjetiva entre eles numa escala de 1 a 10. Quanto maior o peso atribuído, maior a importância do critério. Cada solução recebeu uma nota parcial, de 1 a 10, com relação a cada critério. Quanto maior a nota, melhor a eficiência da solução relativamente ao critério. Para o critério “Custo total”, porém, quanto maior o custo, menor a nota. Calcularam-se então as notas finais e o total para cada solução (tabela 2). Com base nas pontuações recebidas, a solução por meio dos computadores portáteis em redes sem fio pode ser considerada a melhor (595 pontos), seguida pela solução com leitores de códigos de barras em rede cabeada (485 pontos) e, em último lugar, a solução com alimentadores especializados (290 pontos).

Tabela 2 - Pesos e notas para os critérios de seleção

CRITÉRIOS	Pesos	ALIMENTADORES ESPECIALIZADOS		COMPUTADORES PORTÁTEIS		LEITORES DE CÓDIGOS DE BARRAS	
		Nota Parcial	Nota Final	Nota Parcial	Nota Final	Nota Parcial	Nota Final
Acesso <i>on-line</i>	6	10	60	10	60	10	60
Interfaces visuais e sonoras	5	0	0	10	50	5	25
Capacidade de programação	5	0	0	10	50	5	25
Interrupção de produção	10	10	100	0	0	0	0
Expansibilidade	9	0	0	10	90	10	90
Custo total	9	0	0	5	45	10	90
Mudanças de <i>layout</i>	6	10	60	10	60	0	0
Mobilidade	10	0	0	10	100	7	70
Identificação do status atual do <i>set-up</i>	5	5	25	10	50	7	35
Facilidade de substituição	4	5	20	10	40	10	40
Disponibilidade no mercado	5	5	25	10	50	10	50
TOTAL			290		595		485

5. CONCLUSÕES

Na literatura especializada, encontram-se poucas contribuições sobre a redução do tempo de preparação e do controle da qualidade na produção SMT, talvez porque haja um descompasso entre a evolução tecnológica e o amadurecimento da pesquisa. A literatura disponível geralmente trata das formas pelas quais as máquinas irão buscar e assentar os componentes SMT, propondo algoritmos e técnicas para otimização destes tempos.

A maioria dos sistemas de informação voltados à indústria disponibilizados atualmente para venda no mercado exige alto investimento para sua aquisição e mesmo assim,

freqüentemente, não atende adequadamente as necessidades dos clientes, exigindo adaptações. Isso faz com que muitas empresas prefiram desenvolvê-los internamente, o que torna essencial para o meio produtivo a capacidade de projetar e implementar soluções “caseiras”, porém, com desempenho possivelmente muito superior à soluções prontas do mercado.

Dessa forma, não é surpreendente que a solução desenvolvida pelo mercado (alimentadores especializados) tenha recebido a menor pontuação na avaliação deste trabalho, sendo classificada como a pior solução entre as três. Entretanto, esta solução é a única que incorpora um *poka-yoke* de processo na forma de bloqueio da máquina em caso de erros de colocação de componentes, uma robustez no controle não oferecida pelas outras soluções.

A solução por computadores portáteis se mostrou a mais eficiente em termos de potencial de comunicação, capacidade de compartilhamento com outros sistemas, flexibilidade em mudanças de layout da fabricação e mobilidade durante o manuseio. É a única que oferece a possibilidade de apresentação dos dados de montagem no dispositivo móvel, de modo que informações úteis tais como a identificação do componente, posição do alimentador na máquina SMT, ângulo de fixação, tipo de alimentador, entre outras, podem ser acessadas remotamente. A solução por leitores de códigos de barras, se mostrou intermediária. Se, por um lado é a solução menos dispendiosa, por outro lado não oferece a flexibilidade e as possibilidades de comunicação que a solução por *handheld computers* oferece.

As três soluções apresentadas, ao contribuírem para a redução do tempo de *set-up* e para a melhoria do controle da qualidade na produção SMT, devem certamente afetar positivamente o custo de produção, o cumprimento dos prazos de entrega e a motivação dos funcionários. Como propostas incrementais, as soluções podem ser exploradas pela associação à gestão da manutenção nas linhas SMT, pelo monitoramento da mão-de-obra, gerando relatórios e gráficos para avaliar o desempenho dos grupos de preparação.

REFERÊNCIAS

- AJAY J., NEVILLE L., 1998. A modular, parametric vibratory feeder: A case study for flexible assembly tools for mass customization. *IEEE Transactions*, vol. 30, n.10; pp. 923-932.
- AKIYAMA, S, 2001. Inspection Yesterday and Tomorrow – In Japan. *SMT – The Magazine for Eletronics Assembly - SMT Guide to Inspection*, MA; USA, February.
- AMMONS, J. C.; GOVINDARAJ T.; MITCHELL, C. M., 1988. Decision models for aiding FMS scheduling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol.18, n.5, pp. 744-756.
- BROCHONSKI, P. C., 1999. *Sistema para programação da produção com capacidade finita em máquinas SMT*. Curitiba. 126p. Dissertação (Mestrado em Informática). Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada, Pontificia Universidade Católica do Paraná.
- GOUBERGEN, D. V.; LANDEGHEM, H. V., 2001. An Integrated Methodology for More Effective *Set-up* Reduction. *IEEE Solutions 2001*, Conference, Dallas, May.
- HARMON, R. L.; PETERSON, D., 1990. *Reinventing the factory: productivity breakthroughs in manufacturing today* New York: The Free Press.

- JAIN, S., JOHNSON M. E., SAFAI F, 1996. Implementing Setup Optimization on the Shop Floor, *Operations Research*, vol.44, n. 6, pp. 843-851.
- LEON, V. J.; PETERS, B. A., 1998. A comparison of setup strategies for printed circuit board assembly. *Computers and Industrial Engineering*; Vol. 34, n.1, pp.35-39.
- LIDAK, G., 2005. *Controle de qualidade e redução do tempo de set-up em linhas de montagem SMT*. Curitiba. 110p. Dissertação(Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.
- LUCAS FILHO, F. C., 2001. *Utilização de Algoritmos e Heurísticos para Resolução de Problemas de Setup na Programação da Produção*. Universidade do Amazonas, Manaus, Abril.
- MAGAZINE M. J.; POLAK G. G., 2002. *Job Release Policy and Printed Circuit Board Assembly*. Department of QAOM, University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio.
- MAGNELL, M., 2002. Speeding Equipment Changeovers and Setups. Department SMT – *The Magazine for Electronics Assembly*, MA; USA, July.
- SADIQ, M.; LANDERS T. L., 1991. Decision Support System for Intelligent Parts/Slot Assignment on a SMT Placement Machine. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 21, n.1-4, pp. 565-574.
- SMTA, 2006. SURFACE MOUNT TECHNOLOGY ASSOCIATION - Surface Mount Technology. A Historical Perspective; Disponível em http://www.smta.org/files/history_of_smt.pdf. Acessado em: Janeiro 2006.
- TRACEXPRT, 2006. *Advanced Feeder Check*. Disponível em http://www.tracexpert.com/products/fedder_check.asp. Acessado em: Março, 2006.
- TZUR M.; ALTMAN A., 2004. Minimization of tool switches for Flexible Manufacturing machine with slot assignment of different tool sizes. *IIE Transactions*, vol.36, n.2, pp. 95-110.
- WANG, W.; NELSON, P. C.; TIRPAK T. M., 1999. Optimization of High_Speed Multi-Station SMT Placement Machines Using Evolutionary Algorithms. *IEEE Transactions on Electronics Packing Manufacturing*. vol. 22, n. 2, pp. 137-146.