



READEQUAÇÃO TECNOLÓGICA DE PLOTTER PARA PROTOTIPAGEM DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Nelso Gauze Bonacorso¹, Felipe Kalil Mendonça², Gabriel Costa Sousa³, Cassiano Bonin⁴,
Cynthia Beatriz Scheffer Dutra⁵

Resumo: Este trabalho descreve a readequação tecnológica de um *plotter* de mesa plana modelo NE-245, produzido pela empresa EMG da Hungria que, além de desatualizado tecnologicamente, se encontrava inoperante. A meta desta readequação tecnológica foi o de transformar o equipamento que imprimia em papel tamanho A3 em um *plotter* com comando numérico computadorizado (CNC) robusto e confiável para a prototipagem de placas eletrônicas. A readequação tecnológica foi realizada em três etapas consecutivas envolvendo substituições e desenvolvimentos tecnológicos nas respectivas áreas de mecânica, de eletroeletrônica e de programação. Resultados práticos de plotagem em simples e dupla face são apresentados com o objetivo de validar a adequação tecnológica realizada.

Palavras-chave: CNC. Mach3. PCI. *Plotter*. Readequação tecnológica.

Abstract: This article describes a retrofitting of a plain table plotter model NE-245, manufactured by EMG (Hungary) which was technologically outdated and out of service. This equipment was an A3-paper plotter. The goal of this retrofitting was to change this machine into a robust and reliable CNC plotter to be proper for printed circuit boards (PCB) prototyping. The retrofitting was based on technological upgrade of the mechanical parts and electro-electronic devices and also a software development using the Mach3 CNC Controller. PCB samples produced by the retrofitted machine are shown to validate the equipment.

Keywords: CNC. Mach3. PCB, *Plotter*. Retrofitting.

¹ Professor do Departamento Acadêmico de Metal-Mecânica (DAMM), *campus* Florianópolis, IFSC <nelso@ifsc.edu.br>.

² Professor do SENAI-SC <felippe_matsuri@hotmail.com>.

³ Técnico Mecânico do Departamento Acadêmico de Metal-Mecânica (DAMM), *campus* Florianópolis, IFSC <gabrielcosta@ifsc.edu.br>.

⁴ Técnico Mecatrônico do Departamento Acadêmico de Metal-Mecânica (DAMM), *campus* Florianópolis, IFSC <cassbonin@ifsc.edu.br>.

⁵ Professora do Departamento Acadêmico de Metal-Mecânica (DAMM), *campus* Florianópolis, IFSC <cynthia@ifsc.edu.br>.

1. INTRODUÇÃO

As placas de circuito impresso (PCI) são responsáveis pelo suporte mecânico e pelas ligações elétricas entre os componentes eletrônicos do circuito. As PCI virgens são constituídas por um material isolante, fenolite ou fibra de vidro, e uma fina camada de cobre revestindo um ou os dois lados do isolante. As PCI de fibra de vidro possuem maior rigidez mecânica e isolamento elétrico, porém causam um desgaste maior nas ferramentas de usinagem e possuem um custo ligeiramente maior ao das PCI de fenolite.

Na fase de desenvolvimento de um equipamento eletrônico, existe a necessidade da prototipagem de PCI virgens com o objetivo de avaliar o desempenho do protótipo. Neste caso são

fabricadas poucas PCI, o que inviabiliza a terceirização desta produção em virtude do custo unitário elevado. Sendo assim, os processos substrativos, mecânico ou químico, de prototipagem rápida de PCI virgens são as atuais soluções usadas pelos laboratórios de desenvolvimento de produtos e de pesquisa de empresas e instituições de ensino tecnológico.

O processo mecânico de prototipagem rápida é executado em uma máquina automatizada denominada fresadora CNC. Inicialmente esta máquina realiza a furação da PCI e logo em seguida isola os caminhos elétricos de interligação entre os componentes. Segundo os pesquisadores Puhl e Cunha (2008) esse processo é muito preciso, fabricando PCI de excelente qualidade. Entretanto, o ruído produzido pela fresadora CNC é alto e as

PCI de melhor qualidade, as de fibra de vidro, não são fabricadas por este processo devido ao desgaste precoce das caras ferramentas de usinagem.

O processo químico de prototipagem baseia-se na corrosão do cobre por uma solução ácida. Inicialmente são protegidas as futuras ligações elétricas do cobre por meio de uma camada de proteção. Essa proteção pode ser realizada por meio de pintura manual, tela de serigrafia, transferência térmica, resina fotossensível ou plotagem direta. Os quatro primeiros métodos, de acordo com Kugler (2008), são muito dependentes da habilidade do operador e da qualidade dos materiais envolvidos, o que pode gerar retrabalhos e desperdícios.

No caso da plotagem direta, as futuras conexões são desenhadas automaticamente por um plotter de mesa plana, o que garante assim qualidade e evita o desperdício de tempo e materiais. A desvantagem da plotagem direta é que, posteriormente a corrosão, deve-se realizar a furação na PCI, porém esta tarefa é facilitada pela criação de guias pela corrosão no centro das ilhas.

Cabe ainda ressaltar que o custo de um *plotter* de mesa plana é muito inferior ao de uma fresadora CNC, entretanto não existem *plotters* comerciais dedicados à impressão direta em PCI virgens. Sendo assim, decidiu-se adaptar para prototipagem de PCI o *plotter* de mesa plana modelo NE-245, Figura 1, produzido pela empresa EMG da Hungria.

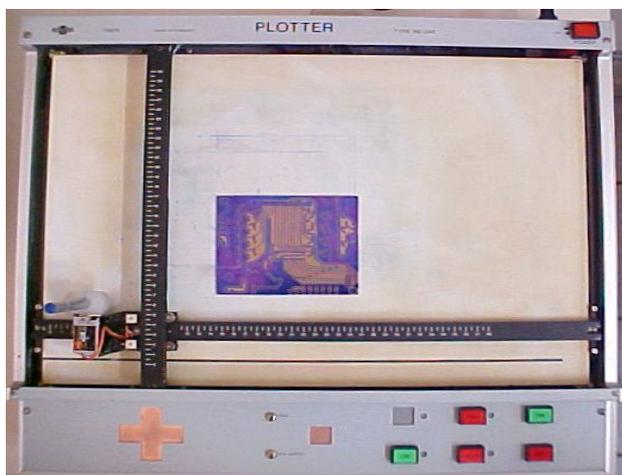


FIGURA 1 - Plotter de mesa plana de tamanho A3.

Em geral, na readequação tecnológica de equipamentos mecatrônicos, há a troca do programa de comando e controle por outro de última geração e também os componentes e acionamentos antigos por modernos e mais confiáveis. Segundo pesquisa realizada por Pansiera (2002), a readequação tecnológica de máquinas desatualizadas apoiadas pelo trinômio da qualidade, do curto prazo de realização e do baixo custo é a solução desejada pelas empresas de fabricação.

2. DESCRIÇÃO DA READEQUAÇÃO

A adequação tecnológica desse *plotter* foi viável em função do excelente estado de conservação do equipamento e também de sua robusta estrutura mecânica. Entretanto, a pouca disponibilidade, ou seja, os baixos níveis de confiabilidade e de manutenibilidade são atribuídos aos seguintes problemas no projeto desse equipamento:

- Imprecisas transmissões de movimento por polias lisas e cabos de aço entre os motores de corrente contínua com escovas e os eixos intermediários X e Y do *plotter*;
- As duas canetas nanquim que acompanham o *plotter* são de ponta grossa e despadronizadas em relação às existentes no mercado nacional;
- Desgaste e imprecisão dos potenciômetros lineares de contato mecânico usados nas realimentações de posição dos eixos X e Y;
- Impossibilidade de efetuar a substituição das escovas dos motores de corrente contínua dos eixos X e Y;
- Não isolamento de sinais elétricos de comando entre o PC e o sistema eletrônico do *plotter*;
- Ausência de um circuito de intertravamento e de sensores de fins de curso para evitar a plotagem com um dos eixos inoperantes ou fora da área de trabalho;
- Programa computacional desatualizado e muito pouco flexível quanto à mudança de parâmetros de plotagem.

Diante dos problemas supracitados foi definida uma nova configuração de operação, Figura 2, que visa transformar o equipamento que imprimia em papel tamanho A3 em um *plotter* CNC para a prototipagem de PCI. Essa adequação tecnológica foi realizada via a integração dos conhecimentos das áreas de mecânica, de eletroeletrônica e de programação.

2.1. Modificações mecânicas

Na parte mecânica do *plotter* foram executadas quatro adequações tecnológicas. A primeira foi à substituição dos motores de corrente contínua com escovas e os imprecisos cabos de aço e polias lisas, acoplamento existente entre os motores e os eixos intermediários do *plotter*, por motores de passo e transmissões de movimento com polias e correias dentadas (Figura 3).

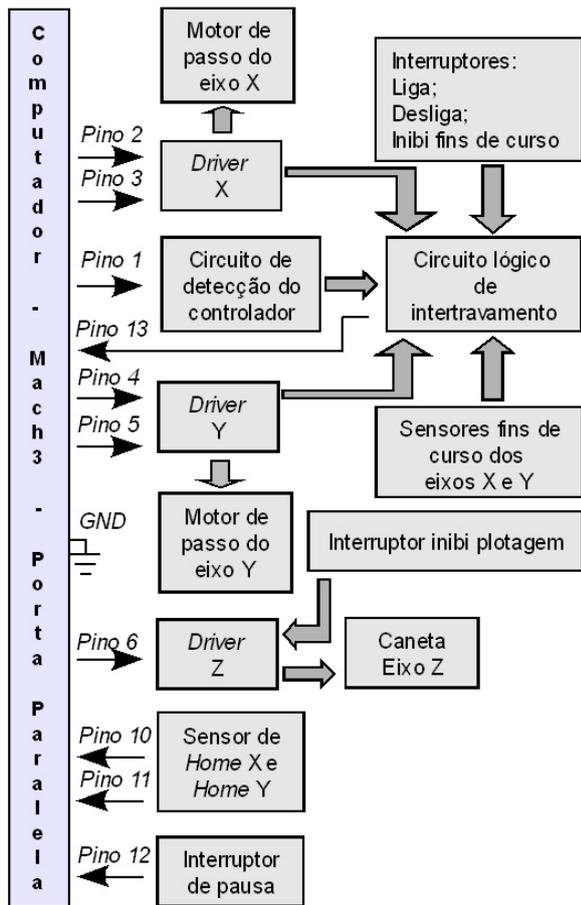


FIGURA 2 - Diagrama de blocos da nova configuração do plotter.

A segunda foi à alteração da relação de transmissão de movimento dos eixos X e Y baseada na resolução dos programas computacionais dedicados ao projeto de PCI para componentes eletrônicos de tecnologia *Pin Through Hole* (PTH). Com essa modificação o plotter passou a ter uma resolução de um milésimo de polegada (1 mil), ou seja, 25,4 μm .



FIGURA 3 - Nova transmissão dos eixos X e Y.

A terceira adequação foi a instalação de seis sensores de contato magnético nos eixos X e Y do plotter. Quatro desses sensores são fins de curso do tipo NF e os outros dois sensores são os de *homes* do tipo NA que definem a posição de zero máquina ($X = 0$ e $Y = 0$).

A quarta e última, foi o projeto e construção de uma peça de suporte em nylon com o objetivo de fixar canetas ao eixo Z do plotter (Figura 4). Esta peça possui um rasgo longitudinal para facilitar o ajuste da altura das canetas em relação à PCI. As canetas comerciais usadas para plotagem são as de ponta fina para retroprojeto a qual produzem trilhas de largura mínima de 0,5 mm.

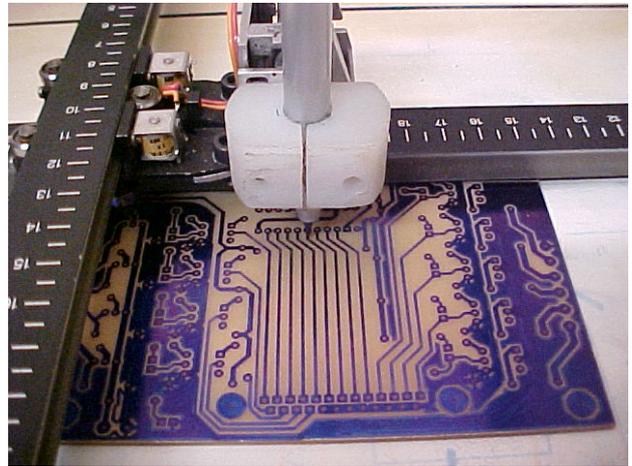


FIGURA 4 - Dispositivo de fixação da caneta, eixo Z.

2.2. Sistema eletroeletrônico

Em virtude dos problemas já mencionados, toda a parte eletroeletrônica do plotter foi substituída. A Figura 5 mostra o novo circuito de potência do plotter o qual alimenta os drivers dos motores de passo X e Y (Figura 6), e também o circuito eletrônico do driver Z que aciona a caneta (Figura 7).

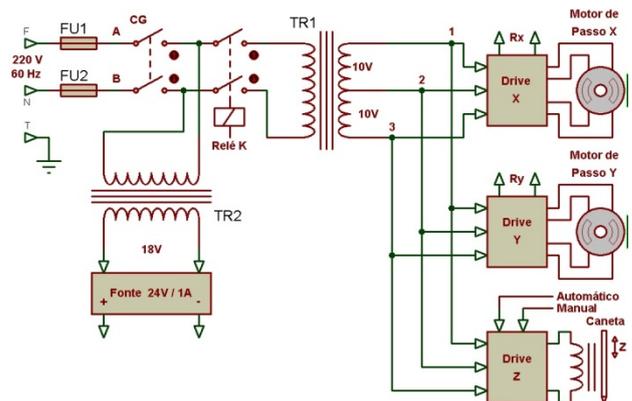


FIGURA 5 - Circuito de potência do plotter.

Os drivers X e Y possuem as seguintes características que justificam sua utilização nesta readequação tecnológica:

- isolamento elétrico para sinais de comandos externos no padrão TTL possibilitando a conexão direta na porta paralela;

- reconhecimento de comandos internos e externos;
- corrente ajustável de 0 a 2,8 A;
- excelente característica torque *versus* velocidade;
- redução automática da corrente do motor quando parado;
- desacionamento automático do motor via proteções internas (R_x e R_y) e baixo custo.



FIGURA 6 - Drivers dos motores de passo dos eixos X e Y (BONACORSO; NOLL; GEVAERD, 2008).

Ambos os motores de passo são acionados pelos seus respectivos *drivers* na configuração meio passo, resolução de $0,9^\circ$, e com imposição da corrente nominal de 1 A por bobina.

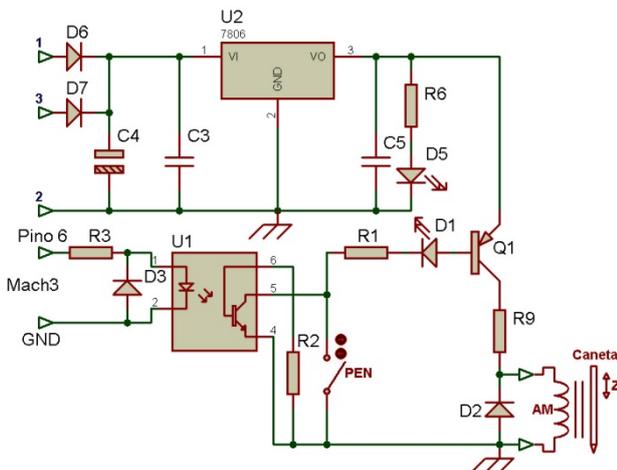


FIGURA 7 - Circuito eletrônico para movimentar a caneta, driver Z.

O *driver Z* também possui isolamento para o sinal de comando automático proveniente do PC. O comando manual desse *driver* pode ser realizado pelo operador através do acionamento do botão com trava normalmente aberto PEN. O acionamento do atuador magnético (AM) proporciona o movimento de translação da caneta na direção do eixo Z do *plotter* com sentido de afastar a ponta da caneta da

PCI. São necessários 5 W de potência elétrica, 5 V e 1 A, no AM para executar esse movimento.

Um importante recurso do controlador CNC Mach3 é o envio de um sinal digital pelo pino 6 da porta paralela, com frequência 12 kHz e razão cíclica de 50%, somente quando o respectivo programa do controlador Mach3 estiver sendo executado no computador. Na sequência este sinal foi isolado, amplificado e reconhecido pelo circuito de detecção do controlador CNC Mach3 (Figura 8) através do acionamento do contato NA do relé K_{DC} . Este contato, por sua vez, habilita juntamente com outros contatos o relé K do circuito lógico de intertravamento (Figura 9), liberando finalmente a energia elétrica (Figura 5) para os atuadores do *plotter*.

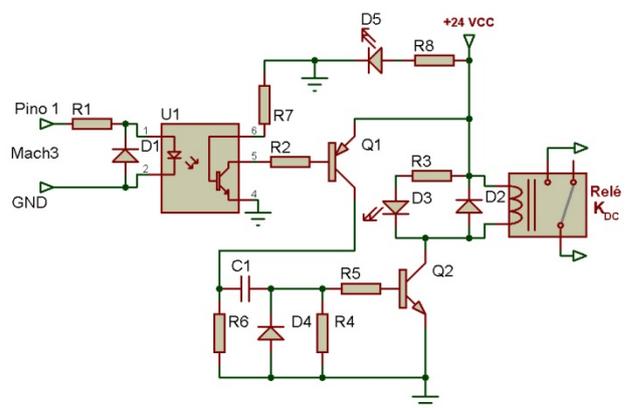


FIGURA 8 - Circuito de detecção da presença do controlador Mach3.

Na essência, o circuito de detecção está sintonizado na frequência de 12 kHz evitando, desta forma, que um outro programa acione de forma incorreta, os atuadores do *plotter*, através da porta de comunicação paralela do computador.

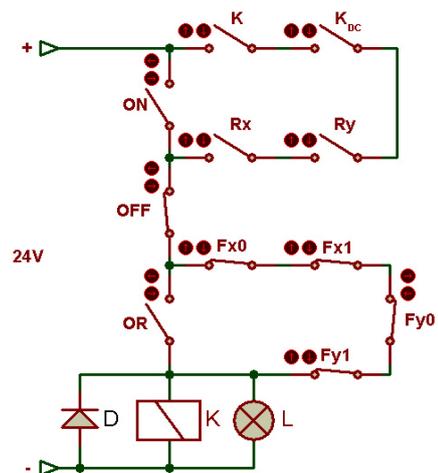


FIGURA 9 - Circuito lógico de intertravamento.

O circuito lógico de intertravamento (Figura 9) interrompe o fornecimento de energia aos atuadores

do plotter. Simultaneamente, o sinal de parada de emergência (PE) (Figura 10) é enviado ao controlador Mach3 nas seguintes situações: acionamento manual do botão de desliga (OFF), falha elétrica em algum *driver* ou motor (R_x e R_y), ausência do controlador Mach3 (K_{DC}) e atuação de um dos quatro sensores de fins de curso (F_{x0} , F_{x1} , F_{y0} e F_{y1}).

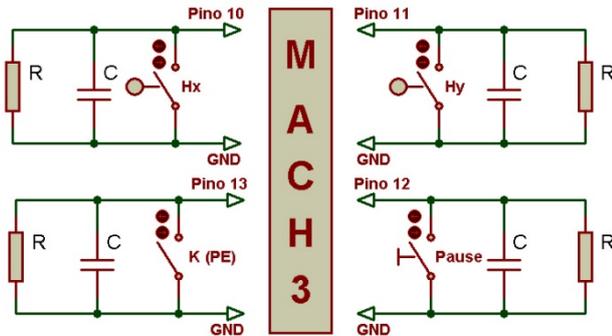


FIGURA 10 - Sinais elétricos de entrada no controlador CNC Mach3.

A última situação operacional informa que a caneta está fora da área de trabalho do *plotter*. Neste caso, o funcionamento é restabelecido através do acionamento simultâneo dos botões ON e OR para a condução da caneta para dentro da área de trabalho do *plotter*.

Além da parada de emergência, duas outras funções no *plotter* (Figura 10) foram implantadas. A primeira busca com velocidade reduzida os sensores de home H_x e H_y . Toda vez que o *plotter* for ligado essa função deve ser executada com o objetivo de buscar a posição zero máquina ($X = 0$ e $Y = 0$). A segunda é a pausa no funcionamento do *plotter*. Essa função é solicitada pelo operador, botão de *Pause*, ao controlador Mach3 nas seguintes situações durante a execução de uma plotagem: troca da caneta em virtude do término da tinta ou ajuste da altura da caneta em relação à PCI.

2.3. Adaptações para o controle do *plotter*

O controlador CNC Mach3 surge como uma opção potencial de controle flexível de baixo custo para máquinas, tais como: *plotters*, mesas XY para corte de materiais, tornos, fresadoras, centros de usinagens e também robôs cartesianos como relatado pelo pesquisador Pereira *et al.* (2012). Seu fabricante, a Art Soft (2008), relata que o Mach3 é um controlador CNC baseado em PC que viabiliza o comando de máquinas com até seis eixos. A interface com os acionamentos e sensores externos pode ser realizada através de uma ou duas portas paralelas padrão do PC. Em adição às tradicionais portas paralelas pode-se expandir o número de entradas e saídas via interface Modbus RS232/Ethernet. Pode-se ainda empregar placas de

controle de movimento mais especializadas ao invés da porta paralela. O Mach3 pode acionar motores de passo e também servos motores DC/AC através de seus respectivos drivers que utilizam o padrão de comando passo/direção. Uma característica bastante atrativa no Mach3 é a flexibilidade. Como se trata de um CNC aberto o projetista de máquinas tem a sua disposição uma ampla possibilidade de *hardwares* e configurações. As telas, os botões e as caixas de diálogo podem ser personalizadas para cada aplicação.

A tela principal do programa do controlador Mach3 possui vários campos para configuração e comandos de funções, Figura 11. Na região superior esquerda, visualiza-se o programa em código G relativo às trajetórias de movimento para plotagem da PCI da Figura 13. Essas trajetórias de movimento são apresentadas na região superior direita dessa tela principal. Já na posição superior central da tela principal encontram-se as posições correntes dos eixos, bem como a opção de referenciar os eixos X e Y. As opções de leitura, edição, partida e parada de execução do programa em código G, entre outros, é acessado na região inferior esquerda da tela principal. A velocidade de avanço da caneta pode ser alterada no transcorrer da execução de uma plotagem no campo denominado *Feed Rate* da tela principal.



FIGURA 11 - Tela principal do programa do controlador CNC Mach3.

Para o correto funcionamento do controlador CNC Mach3 é necessário ter instalado o sistema operacional Windows XP ou 2000, uma capacidade de processamento de 1 GHz, 1 GB de RAM e tela com resolução de 1024 x 768 pixel. O custo de licenciamento do Mach 3 é de US\$ 175,00, o que o torna bem acessível mesmo para aqueles projetos sensíveis ao custo. Outro ponto de estímulo ao uso do Mach3 é a grande rede de comunicação existente

entre os usuários do sistema pelo mundo. Os diversos fóruns e grupos de pesquisa proporcionam uma excelente base de suporte, o que torna mais eficiente e rápido o desenvolvimento de novas aplicações e funcionalidades.

Na parte de programação, a readequação abrangeu a preparação do PC, desativando recursos não necessários e a instalação e parametrização do controlador CNC Mach3 para o perfeito funcionamento do *plotter*. Com base em experimentos de laboratório foram definidos os seguintes parâmetros relativo à tarefa de plotagem:

- velocidade de avanço máxima dos eixos X e Y igual a 50,8 mm/s (Figura 12). Esse valor está limitado somente à capacidade de escoamento da tinta da caneta;
- aceleração e desaceleração dos eixos X e Y igual a 406,4 mm/s² (Figura 12). Acima deste valor ocorre perda de passos nos motores;
- tempo de subida e de descida da caneta, eixo Z, igual a 0,1s.

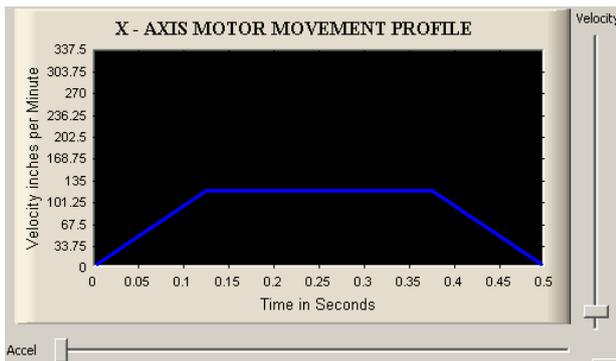


FIGURA 12 - Perfil trapezoidal de velocidade dos motores de passo do *plotter*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No *software* ARES de projeto de PCI da plataforma Proteus foram gerados *layouts* com o objetivo de validar a readequação realizada através da inspeção visual da qualidade das respectivas plotagens.

A Figura 13 mostra o projeto de uma PCI simples do circuito de detecção da presença do controlador CNC Mach3 da Figura 8. Na Figura 13 foram criadas áreas de cobre com a finalidade de prolongar a vida útil da solução química na etapa de corrosão. As informações da espessura da caneta e da imagem espelhada do lado da solda desse projeto foram exportadas pelo *software* ARES ao controlador Mach3 no formato HPGL. A seguir, a ferramenta computacional DeskCNC transformou o arquivo do tipo HPGL em um programa contendo as trajetórias de plotagem em código G. Por fim,

esse programa em código G foi executado plotando essa imagem espelhada sobre o cobre da PCI, Figura 14.

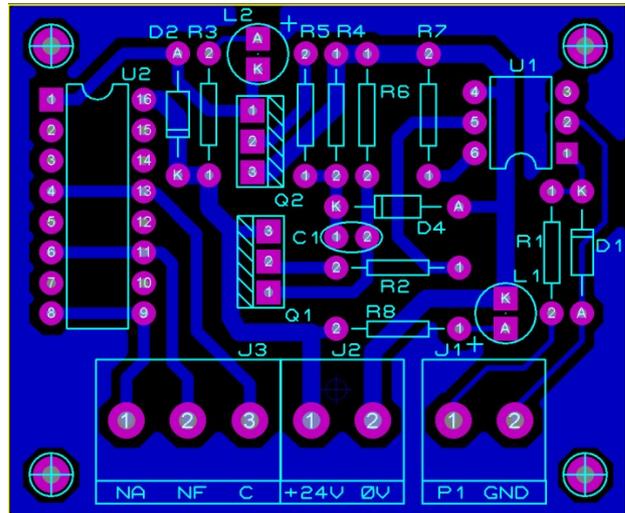


FIGURA 13 - *Layout* do circuito da Figura 8, gerado no *software* ARES.

A fim de minimizar o tempo de plotagem foram desenhados pelo *plotter* apenas: as ilhas, as trilhas e os contornos das áreas de cobre deixando o preenchimento dessas áreas internas para uma posterior etapa manual. Observa-se na Figura 14 que há ausência de tinta no centro da maioria das ilhas. Este importante detalhe facilita a orientação da furação pela criação de guias durante a etapa de corrosão.

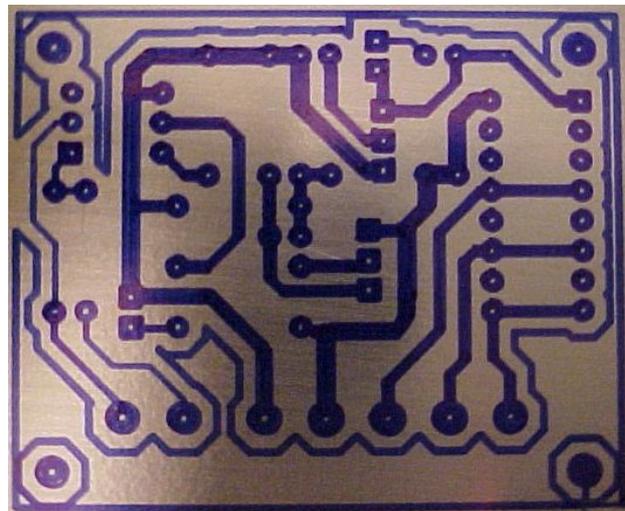


FIGURA 14 - Plotagem da imagem espelhada, lado da solda da Figura 13.

Uma das vantagens dessa técnica é que a tinta empregada além de proteger o cobre nas regiões pintadas da solução química de corrosão serve também como proteção futura do cobre das PCIs. Nos locais de solda a tinta apenas evapora com a presença do calor não interferindo desta forma na qualidade da união entre componentes e a PCI.

Para avaliar a alternativa de confecção de PCIs de dupla face, foi executado o projeto da Figura 15. Neste projeto, as trilhas em azul correspondem às trilhas da face inferior, *bottom*, e as trilhas em vermelho às da face superior, *top*. O processo de plotagem dupla face é similar ao de simples face, porém, na primeira etapa dois arquivos devem ser exportados pelo *software* ARES, um para cada face, com referência no centro e não nas arestas, como é no caso de PCI simples.

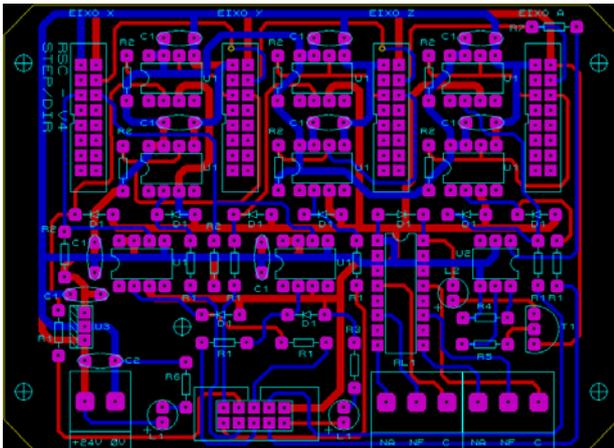


Figura 15 - Layout de dupla face gerado no ARES.

Então, foram seguidos os mesmos procedimentos da confecção de PCI simples até a execução do código G. Finalizada a plotagem da primeira face (Figura 16) é necessário trocar o lado da PCI.

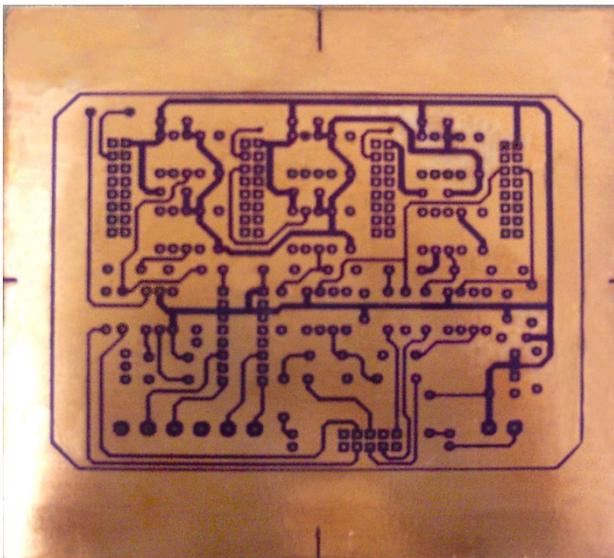


FIGURA 16 - Plotagem da face inferior espelhada da Figura 15, layout azul.

Para tanto, foi feita uma marcação em cruz como referência na mesa do *plotter* e, em seguida, transpostas para a face ainda não plotada da PCI (Figura 17). Deste modo, ao trocar o lado da PCI, as duas faces se mantiveram alinhadas e o centro se

mantve o mesmo, validando assim a alternativa de confecção de PCIs de dupla face.

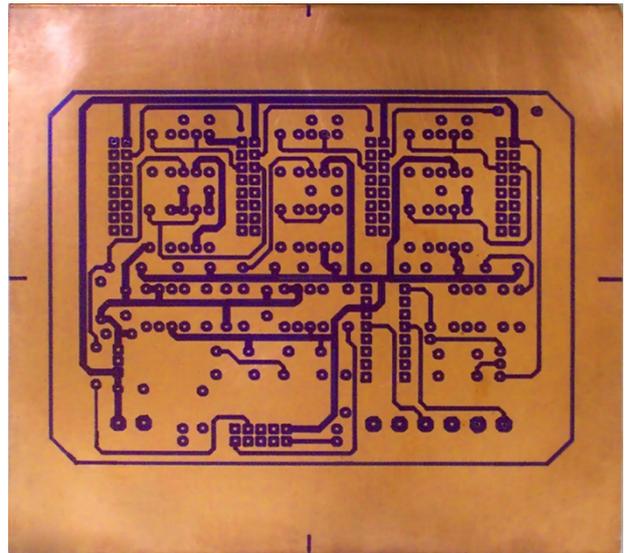


FIGURA 17 - Plotagem da face superior da Figura 15, layout vermelho.

Outro teste foi realizado objetivando avaliar a repetitividade do *plotter*. Nesse aspecto a qualidade do trem de pulsos gerado pelo Mach3, os próprios *drivers* e motores de passo constituem importantes fontes de erros. Um ponto de referência foi determinado sobre a mesa do *plotter* e marcado com a ponta da caneta. A plotagem da Figura 18 foi executada várias vezes. Após cada execução a ponta da caneta era enviada ao ponto de referência. Em nenhum ciclo de execução se constatou erro de posicionamento visual.

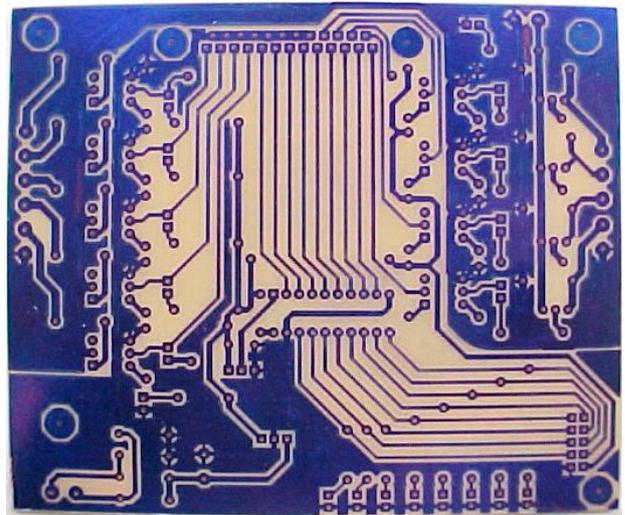


FIGURA 18 - Foto do lado da solda de uma PCI após as etapas de: plotagem, corrosão e furação.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A readequação tecnológica se mostrou uma boa solução para adequação de máquinas ultrapassadas

tecnologicamente ou necessitando de manutenção. Uma vez que, o *plotter* voltou a funcionar com um melhor desempenho proporcionado pelos atuais *drivers* de acionamento dos motores de passo. Esse incremento se deve ao aumento de velocidades e acelerações dos eixos da máquina em virtude da excelente característica torque *versus* velocidade dos conjuntos: *driver* e motor de passo.

O Mach3 sendo um controlador de baixo custo e aberto se mostrou muito versátil e eficaz nesta adequação tecnológica, proporcionada pela configuração flexível e pela existência de uma gama de importantes recursos operacionais.

O teste de posicionamento do *plotter* realizado valida a solução de readequação detalhada neste artigo. Observou-se que o sistema é robusto e preciso não resultando em perda de passo e erros de arredondamento pelo sistema de interpolação do Mach3.

Além da meta almejada inicialmente, que era o *retrofitting* do *plotter*, alcançou-se um patamar no qual o equipamento se mostrou confiável e seguro. Além disso, o fato de se tratar de um projeto de baixo custo torna a opção pela atualização tecnológica ainda mais atrativa para empresas de fabricação e instituições de ensino que possuam máquinas desatualizadas. Em resumo, tal desenvolvimento realizado tornará mais rápido a realização de futuros projetos no IFSC.

Agradecimentos

Os autores agradecem a colaboração prestada pelo professor Felício José Gesser do IFSC no desenvolvimento deste equipamento e ao CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- ART SOFT. **Using Mach3 Mill**. 2008, p.1-157. Disponível em <http://www.machsupport.com/wp-content/uploads/2013/02/Mach3Mill_1.84.pdf>. Acessado em 1 dez. 2013.
- BONACORSO, N.G.; NOLL, V.; GEVAERD, B.M. Desenvolvimento de um driver de corrente didático para acionamento de motores de passo híbrido aplicados ao ensino de eletrônica de potência e mecatrônica. **Revista da Associação Brasileira de Eletrônica de Potência**, v. 13, n. 2, pp. 117-123, 2008.
- KUGLER, M. **Projeto de Placas de Circuito Impresso**. pp. 28-39, 2008. Disponível em <http://www.mauriciokugler.com/publications/pcb_mauricio_kugler.pdf>. Acessado em 1 de dez. 2013.
- PANSIERA, P.E. A ciência do retrofitting - conceitos básicos. **Revista Mecatrônica Atual**, v. 1, n. 2, pp. 41-43, 2002.
- PEREIRA, T.A.; ROESNER, A.A.; THIAGO, F.E.S.S.; CRISTOFOLINI, I.; WEIZENMANN, G.S.; BONACORSO, N.G. Readequação tecnológica de baixo custo de robôs cartesianos – robô sankyo. **Revista Ilha Digital**, v. 3, pp. 65-70, 2012.
- PUHL, E.B.; CUNHA, R.R.M. Projeto e fabricação de uma fresadora cnc para usinagem de placas de circuito impresso. V **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM 2008**, Salvador - BA, 2008.