

PROCESSAMENTO *ON-THE-FLY* DE MATERIAIS POR LASER

Claudio Abilio da Silveira, claudio.silveira@posgrad.ufsc.br¹

Walter Lindolfo Weingaertner, w.l.weingaertner@ufsc.br¹

Milton Pereira, milton.pereira@ufsc.br¹

¹ Univesidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, Florianópolis - SC, 88040-900.

Resumo: O processamento de materiais com laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) depende não somente de características ópticas, mas também dos dispositivos que propiciam a sua entrega. A movimentação relativa entre o feixe laser e o ponto de processamento pode contar com diferentes dispositivos para ser executada. Os eixos lineares translativos permitem a movimentação e orientação do feixe, contudo, podem apresentar velocidade e exatidão que limitam a potencialidade do laser. Nos cabeçotes galvanométricos a movimentação dos espelhos permite o direcionamento em velocidades elevadas, mas devido às características inerentes o alcance do feixe sobre um plano não ultrapassa geralmente algumas centenas de milímetros. No entanto, estes dois dispositivos de entrega de laser podem ser combinados para usufruir de vantagens particulares como a movimentação em altas velocidades (propiciadas pelo cabeçote galvanométrico) estendida a uma grande área de alcance (definida pelos eixos lineares). Este artigo apresenta as características encontradas em sistemas com movimentação síncrona entre cabeçote galvanométrico e eixos lineares, também chamados de sistemas *on-the-fly*, aplicados no processamento de materiais com laser. Na movimentação do tipo *on-the-fly* ocorre a movimentação simultânea dos dispositivos e não somente deslocamentos discretos. São abordados aspectos como a velocidade, exatidão e limitações. As estratégias de utilização de cabeçotes galvanométricos e características do feixe laser como potência, densidade de energia e morfologia também são citadas. Incluem-se ainda as exigências necessárias para garantir o funcionamento de sistemas *on-the-fly* com laser de emissão contínua e pulsada. Conclui-se que a movimentação combinada de cabeçote galvanométrico e eixos lineares maximiza e expande a utilização de laser no processamento de materiais, no entanto, apresenta forte dependência da integração entre os componentes utilizados para um resultado de excelência.

Palavras-chave: *on-the-fly*, cabeçote galvanométrico, galvo, laser, processamento de materiais.

1. INTRODUÇÃO

O processamento de materiais com *laser* se estende a uma ampla gama de aplicações como corte, microusinagem, marcação, texturização, tratamento térmico e outros. Este processamento compreende a utilização de uma emissão de luz *laser* gerada por uma fonte e sua condução até a área a ser processada. Diferentes dispositivos são empregues para transportar e condicionar as características do feixe *laser* em função do tipo de fonte utilizada e do tipo de processamento desejado. O transporte de feixe *laser* da fonte até a área de trabalho é realizado por meio de elementos ópticos tais como espelhos, lentes e fibras ópticas.

A movimentação relativa do feixe *laser* que chega ao efetuator final em relação ao material processado pode realizada por unidade de movimentação linear, braços robóticos e em casos específicos por movimentação manual. A utilização de eixos lineares é amplamente difundida nos equipamentos indústrias, sendo frequentemente encontrada em diversas áreas de atuação.

No entanto a utilização de *laser* muitas vezes está associada à velocidade de processamento mais elevadas que aquelas encontradas em sistema de movimentação convencionais. Uma forma de atender a demanda por dinâmicas elevadas para alguns processamentos com *laser* é o emprego de *scanners* galvanométricos (também referenciados como cabeçotes galvanométricos ou simplesmente galvos). Nestes dispositivos o direcionamento do feixe *laser* ocorre por meio da sua deflexão em espelhos o que resulta em um deslocamento rápido do ponto de incidência do *laser* na superfície de trabalho.

A combinação das vantagens oferecidas pelos eixos lineares, principalmente no que diz respeito a grande área de trabalho que pode ser alcançada, com a dinâmica oferecida pelos *scanners* galvanométricos resulta em soluções interessantes para o processamento de materiais com *laser*. Essa movimentação síncrona entre eixos lineares e *scanners* galvanométricos recebe a denominação de *on-the-fly*.

2. EIXOS LINEARES

O deslocamento linear encontrado em máquinas automatizadas é popularmente formado pelo conjunto de guias de elementos rolantes e fuso de esferas devido a performance e modularidade (Altintas et al., 2011) propiciada por estes dispositivos. Devido ao baixo atrito entre os elementos das guias lineares de rolamento observa-se uma maior resistência ao desgaste e baixa incidência do fenômeno *stick-slip* em comparação com guias de deslizamento. Fuso de esferas recirculantes pode ser simplisicamente descrito como um parafuso que transmite movimento para uma porca sendo que entre eles há uma série de elementos rolantes que circularam por um caminho fechado.

Nos eixos lineares voltados para aplicações que necessitem velocidades e acelerações elevadas são empregados motores lineares. Nesta abordagem a movimentação entre as partes estáticas e móveis é gerada diretamente por uma força magnética presente na parte secundária e primária do motor (Altintas et al., 2011). Embora mantenha-se as guias lineares são eliminados o acoplamento, o fuso de esferas e seus mancais, consequentemente a incerteza de posicionamento deste elementos também é eliminada (Moriwaki, 2008). Um exemplo da configuração com motor linear e com fuso de esferas pode ser observado na Fig. (1).

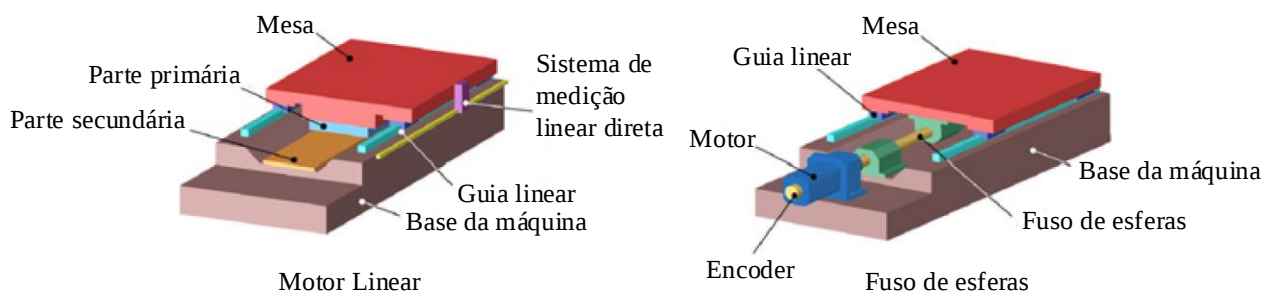


Figura 1. Mecanismos com motor linear e fuso de esferas, adaptado de Altintas et al. (2011).

3. SCANNERS GALVANOMÉTRICOS

Os *scanners* galvanométricos são constituídos por elementos eletromecânicos que defletem o feixe *laser* utilizando espelhos com movimentos controlados. A deflexão do feixe permite orientar a posição de incidência do *laser* sob uma superfície ou plano de trabalho, permitindo assim o processamento de material. A constituição básica de um *scanner* galvanométrico inclui os elementos motores, espelhos, lentes, estrutura mecânica e unidades adicionais de condicionamento do feixe *laser*.

O princípio de funcionamento é baseado na utilização de dois atuadores eletromecânicos com giro limitado conhecidos como galvanômetros. Nos galvanômetros uma corrente elétrica é inserida em uma bobina para formar um campo magnético que interage com o campo de imã permanente. A interação entre os campos promove a movimentação rotacional de um eixo. Um espelho acoplado ao eixo do atuador permite realizar a deflexão do feixe incidente em uma direção, quando combinado com outro espelho é possível orientar o feixe em duas direções. Esta arquitetura com dois espelhos, que pode ser observada na Fig. (2), é a mais comum nos *scanners* galvanométricos 2D.

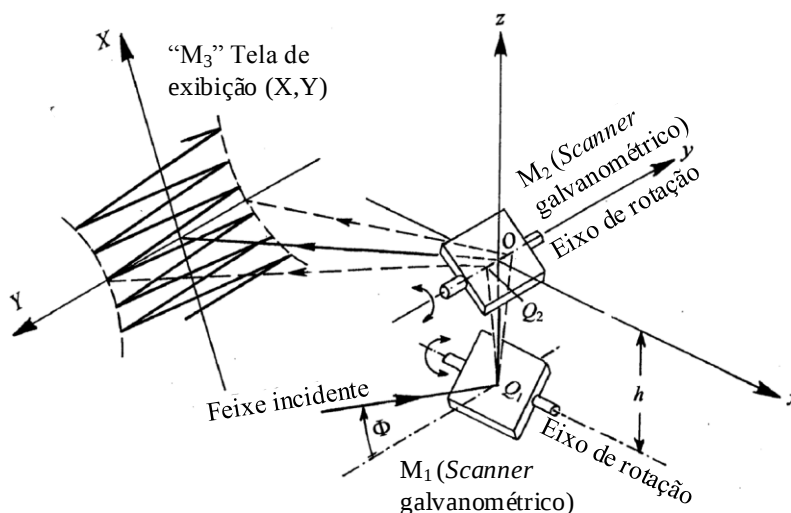


Figura 2. Arquitetura com dois espelho em um *scanner* 2D, adaptado de Li (2008).

Para que ocorra a focalização do feixe *laser* colimado é utilizada uma óptica que converge a emissão de luz para um dado ponto focal. Embora a convergência do feixe possa ser obtida com uso de espelhos de curvatura côncava, o uso de lentes é muito mais difundido nos *scanners* galvanométricos encontrados comercialmente. Os dois tipos básicos de configuração para as lentes focais em *scanners* se dividem em pré e pós-objetiva (Chen et al., 2008). No caso dos sistemas com pré-objetiva (Fig. (3)a) o feixe *laser* atinge primeiramente os espelhos para em seguida ser convergido por uma lente focal antes de incidir sobre a superfície do material processado. Quando o feixe *laser* encontra a lente de foco e posteriormente é defletido pelos espelhos tem-se a configuração de *scanner* pós-objetiva (Fig. (3)b).

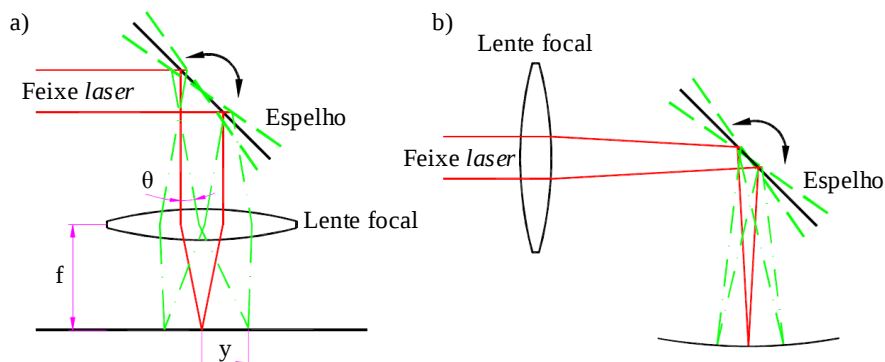


Figura 3. Configuração óptica (a) pré-objetiva e (b) pós-objetiva, adaptado de Chen et al. (2008).

Nas lentes F-thetas compostas por um elemento óptico simples o erro de distorção oriunda da utilização dos espelhos é usualmente de 2 % - 3 %. Lentes com múltiplos elementos ópticos com superfície livre apresentam uma característica melhorada com erros situados abaixo de 0,36 % para distâncias focais inferiores a 75 mm (Sintetic Optronics, 2016). Ainda há os elementos ópticos de múltiplos focos, que permitem dividir o feixe para gerar múltiplos pontos ou padrões arbitrários que são utilizados em processamento de materiais em larga escala (Zimmermann and Schmidt, 2011).

Outra estratégia de melhora da uniformidade da exatidão de posicionamento de foco sobre um plano é a utilização de componentes complementares a configuração tradicional dos *scanners* galvanométricos. Um módulo de foco dinâmico (DFM – *Dynamic Focusing Module*) é utilizado para ajustar a posição do ponto focal na área de trabalho expandindo o campo de atuação da lente F-theta (Yang et al., 2016). Nesta abordagem é inserida uma lente de expansão do feixe *laser* e uma lente objetiva antes da entrada no *scanner*. A lente de expansão possui um deslocamento ativo no sentido do eixo óptico que irá resultar uma variação da distância do ponto onde o foco do *laser* incide. Esse método de minimização de erros estáticos e dinâmicos de focagem pode ser observado na Fig. (4).

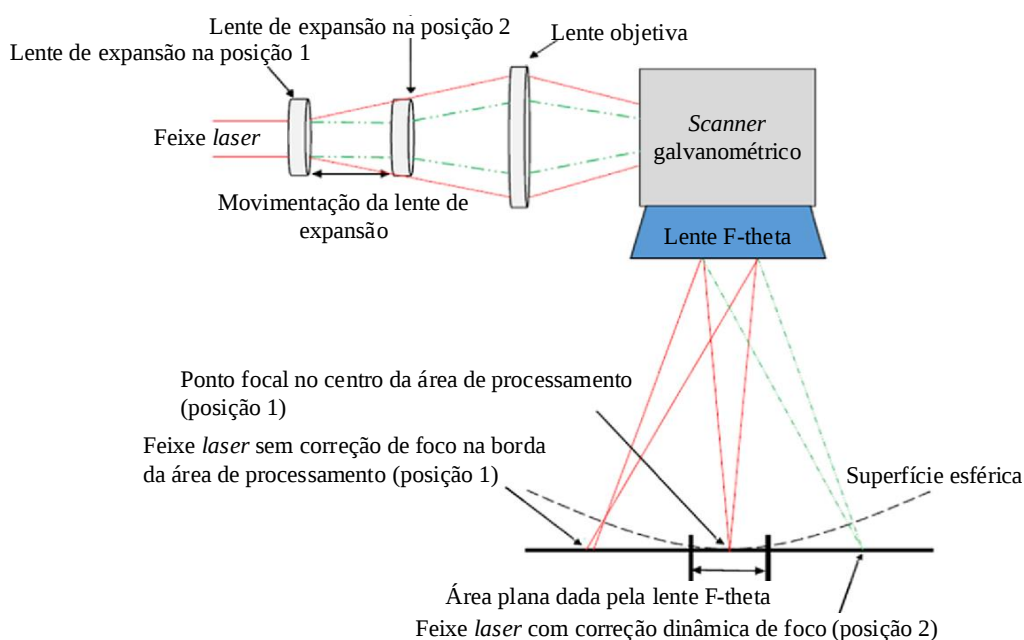


Figura 4. Ilustração da operação de um sistema de foco dinâmico com lente F-theta, adaptado de Yang et al. (2016).

Esta proposta pode ser implementada ainda pela substituição da lente F-theta por uma estrutura com uma lente focal de inclinação dinâmica realizada por um mecanismo giroscópio. A inserção do mecanismo de inclinação permite expandir o campo de trabalho do *scanner* para um mesmo limite de inclinação dos espelhos, situado próximo a 20° na maioria dos galvanômetros (Yang et al., 2016). O uso do sistema de foco dinâmico permite corrigir os erros de focagem do *laser* introduzidos pelo movimento de inclinação da lente, ao ponto que o erro de posicionamento é corrigido por equacionamento matemático.

Nas abordagens que utilizam artifícios ópticos estáticos como lentes F-thetas e controles dinâmicos com o sistema de variação da distância focal o objetivo é promover uniformidade ao longo de toda a área de trabalho. Desta forma a distribuição de energia, tamanho de foco e sua simetria apresentam pouca variação sobre o material processado. O resultado da compensação de erro utilizando um sistema de foco dinâmico pode ser observado na Fig. (5).

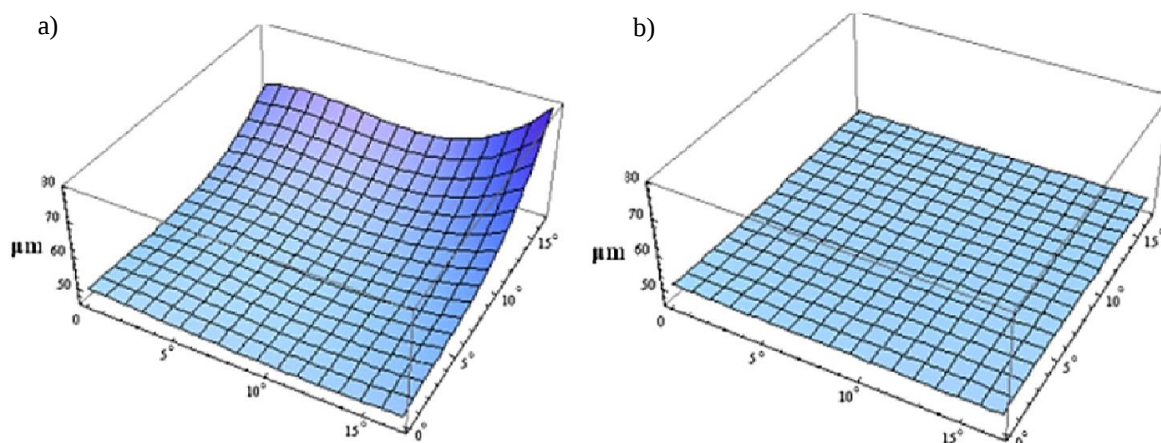


Figura 5. Distribuição do tamanho focal em ¼ da área de trabalho (250 mm x 250 mm) sem Dynamic Focusing Module (DFM)(a) e com DFM (b) (Yang et al., 2016).

Observa-se que o tamanho de foco do *laser* na Fig. (5) se mantém dentro do valor esperado de 50 μm quanto mais próximo do centro de atuação da área de trabalho. No entanto, nas áreas periféricas a regularidade decai devido ao aumento da não linearidade inerente do sistema óptico. Quando aplicada a correção provida pelo sistema de foco dinâmico ocorre a manutenção das características desejadas do feixe ao longo de toda a área de trabalho.

Outra categoria particular de *scanners* são os poligonais, onde um elemento óptico rotativo, Fig. (6)a, geralmente um espelho de metal, com três ou mais faces reflexivas deflete o feixe *laser* (Marshall and Stutz, 2011). Varreduras unidirecionais, altas taxas de varredura, grandes aberturas, grandes ângulos de varredura ou grande números de pontos marcados são suas principais características de utilização. O movimento de rotação modifica o ponto no qual o *laser* incide sobre o espelho, resultando em um movimento linear no plano de trabalho, como representado no esquemático da Fig. (6)b. A rotação do espelho situada entre 4.000 rpm e 20.000 (limitada pelo uso de rolamentos) e ângulos de escaneamento (θ) entre 5° e 70° são usuais (Marshall and Stutz, 2011).

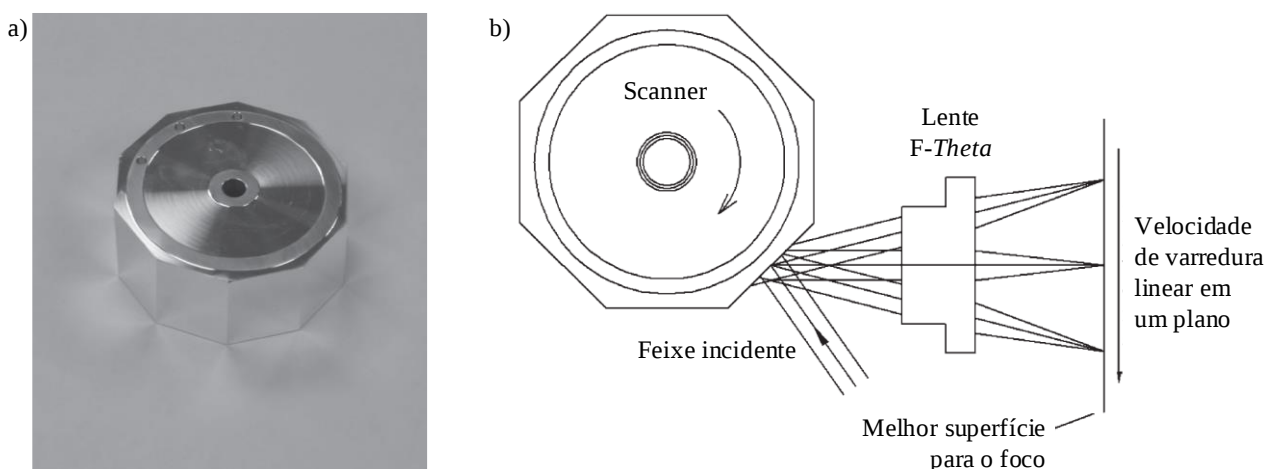


Figura 6. Espelho prismático (a) e sua utilização na deflexão do feixe *laser* em um *scanner* poligonal com óptica pré-objetiva (b), adaptado de Marshall and Stutz (2011).

3.1. Limitações em *Scanners Galvanométricos*

Um aspecto limitante para a utilização de *scanner* é o limiar de danos dos espelhos e seus revestimentos. Devido às características de dissipação térmica do substrato e do revestimento reflexivo os *scanners* são limitados os níveis de densidade de potência compatíveis com os elementos ópticos internos. O mecanismo de danos nestes componentes varia de acordo com o tipo de emissão *laser*.

Na utilização de *laser* contínuo os efeitos térmicos são predominantes devido a fração de energia luminosa absorvida. Mesmo com uma refletividade na ordem de 99,9 % um revestimento submetido a uma determinada potência, sem condições favoráveis de dissipação, pode sofrer distorções e inclusive evaporar (Brown, 2009). Espelhos projetados para densidade de energia de até 500 W/cm² tem alcançado resultados satisfatórios na maioria das aplicações com *laser* contínuo e de pulso longos. Na utilização pulsos no regime de ps e fs o limiar de danos contempla efeitos de ruptura dielétrica e avalanche de elétrons respectivamente (Dold et al., 2011).

Assim como em outras atividades de processamento de materiais, os elementos óticos presentes no *scanner* de sistemas de movimentação *on-the-fly* estão sujeitos a contaminações. A contaminação orgânica resultante da absorção de compostos liberados por certos materiais ao longo da vida útil dos elementos óticos contribui para a redução do limiar de danos induzido pelo *laser* (Favrat et al., 2014). O tamanho do contaminante aderido ao elemento óptico é determinante, pois quanto maior sua dimensão mais energia é absorvida pelo espelho após o equilíbrio térmico da partícula (Han et al., 2016).

A morfologia do feixe *laser* também apresenta influência nas características de limiar de danos dos espelhos, a densidade de energia ao longo do perfil do feixe muitas vezes desvia dos modelos gaussiano e *hat-top* (Wagner et al., 2015). As distribuições de energia irregulares contribuem para efeitos negativos da distorção térmica nos elementos óticos. Os feixes *laser* com distribuição irregular da macha focal tem essa característica morfológica acentuada pelas distorções óticas inerentes do *scanner*. Uma vez que o feixe possui uma forma assimétrica o ponto de varredura sobre o material processado está sujeito a mudanças de tamanho e orientação a medida que se afasta do centro da área de trabalho (Li, 2008).

Uma influência negativa no processamento de materiais que demandam elevada qualidade final é a não uniformidade da densidade de energia entregue durante os movimentos de aceleração e desaceleração do *scanner* nos padrões de preenchimento e contornos. As soluções consistem em comandar o *laser* com exatidão a uma velocidade de varredura constante ou modular a potência em função da velocidade (Luo et al., 2017).

O sistema de controle é um fator importante para a velocidade e exatidão de resposta do *scanner* galvanométrico. A solução mais simples a ser empregada é a chamada “malha aberta” na qual não existe realimentação de informação com a real posição dos espelhos. Neste caso qualquer imperfeição ou não linearidade induz a erros resultantes da diferença existente entre a posição designada e a obtida (Kacperski et al., 2015).

Nas soluções de controle que apresentação um sensor de posição adicional é possível comparar a corrente posição com o valor esperado e determinar a correção necessária para compensar o desvio de erro. Nesta abordagem de “malha fechada” é possível mapear de forma mais exata a posição do eixo do galvanômetro e minimizar os erros existentes. Contudo, o sensor de posição e a eletrônica adicional elevam os custos do sistema, justificando o seu uso apenas para aplicações com elevadas demandas (Kacperski et al., 2015).

4. SINCRONIZAÇÃO ENTRE EIXOS E SCANNER

As configurações de *software* e *hardware* em equipamentos comerciais *on-the-fly* variam conforme as características dos dispositivos que constituem o sistema. Dependendo do fabricante o processamento necessário para a movimentação síncrona entre eixos lineares e *scanner* galvanométrico pode estar centralizado ou distribuído entre diferentes módulos.

A composição básica dos sistemas *on-the-fly* inclui o conjunto de eixos lineares, o *scanner* galvanométrico e um sistema de controle. As informações de posição dos eixos são transmitidas para o sistema de controle, neste sistema é pré-calculada a posição dos espelhos do *scanner*. Pode ser utilizado o chamado algoritmo de *offset* zero, que procura mantém uma distância zero entre o centro da área do *scanner* e a posição do *laser* nesta área por meio da movimentação dos eixos lineares (Kim et al., 2011).

Na configuração montada pela empresa Newport, Fig. (7), é possível observar a presença de um computador com o *software* que se comunica com *hardware* de controle responsável pela geração dos sinais (bloco XPS Controller), o protocolo de comunicação utilizado é *Ethernet*. Os sinais gerados pelo *hardware* comandam os eixos lineares X e Y (bloco Newport Stages) e o *scanner* galvanométrico, este por sua vez recebe energia de uma fonte externa. Um bloco lógico é responsável por interpretar o programa com a trajetória a ser executada permite adicionar movimentos sincronizados dos eixos e do *scanner* galvanométrico e comandar eventos externos como o disparo do *laser*.

Essa configuração utiliza um *scanner* galvanométrico com uma interface de sinais XY2-100, considerada o padrão industrial para controle destes dispositivos. Esta conexão garante a alimentação dos eixos galvanométrico e a informação analógica corresponde a posição desejada dos espelhos. Para o comando do *scanner* galvanométrico o *hardware* gera um sinal analógico de ± 10 V proporcional a deslocamento necessário para atingir a posição determinada no programa em execução.

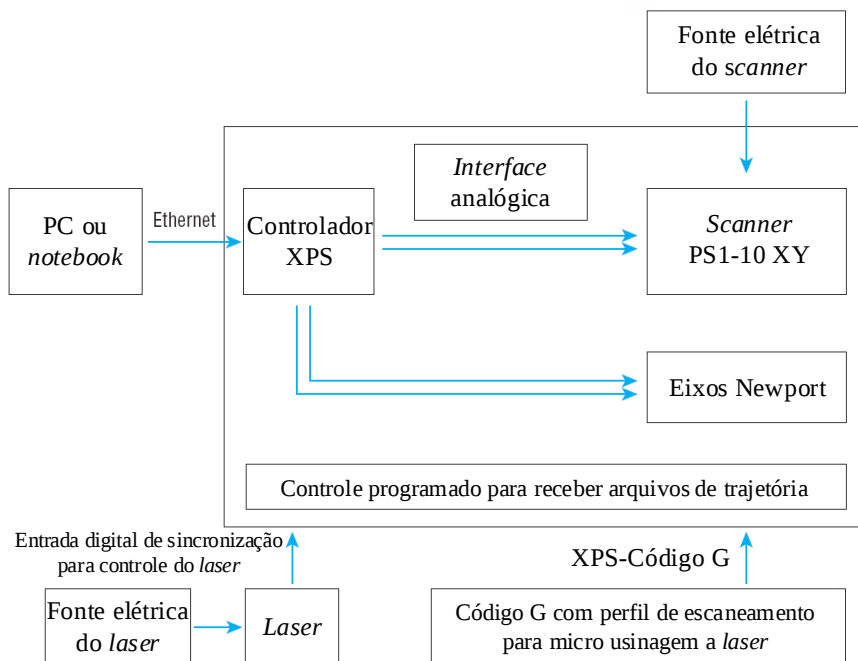


Figura 7. Configuração *on-the-fly* com dois eixos lineares e scanner galvanométrico oferecida pela Newport, adaptado de Newport (2013).

Uma configuração *on-the-fly* da empresa Aerotech que integra dois eixos de movimentação linear e um scanner galvanométrico 2D é ilustrada na Fig. (8). Novamente observa-se a utilização de *software* de controle de movimento baseado em computador denominado A3200, que neste caso utiliza protocolo FireWire para comunicação. As informações de controle dos eixos e do scanner compartilham o mesmo barramento de comunicação que interliga os componentes em uma rede FireWire.

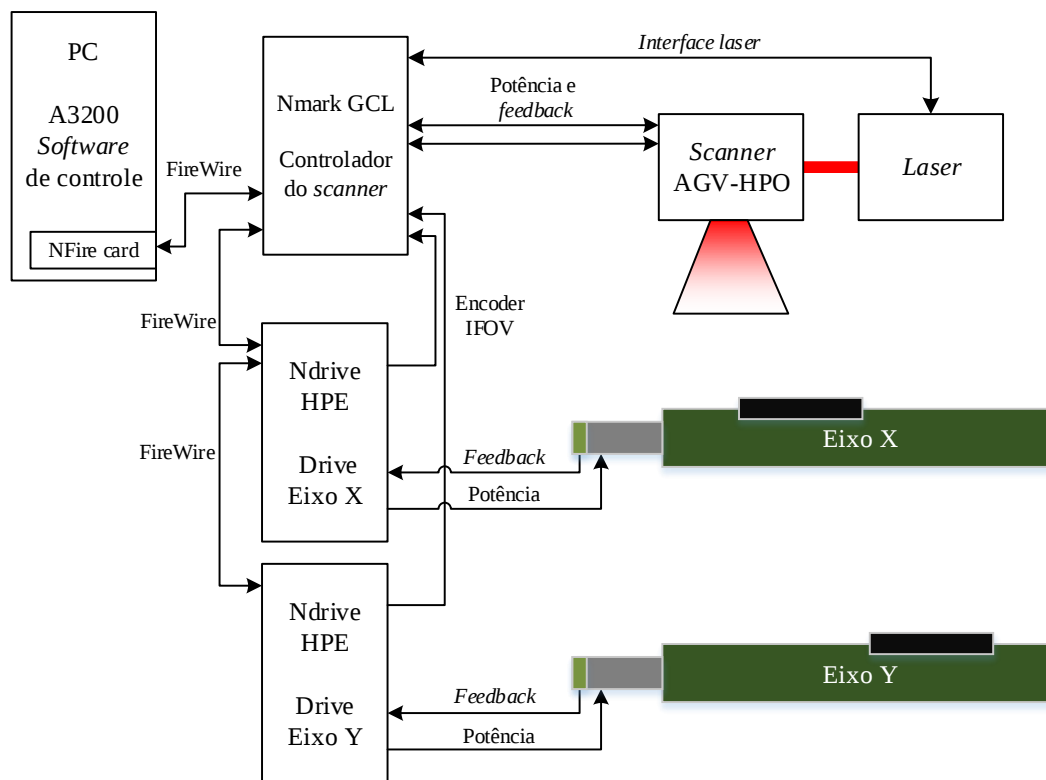


Figura 8. Configuração *on-the-fly* oferecida pela Aerotech, próprio autor.

Para estabelecer a movimentação síncrona o controlador Nmark GCL adquire a posição real dos espelhos utilizando a informação fornecida pelo sensor de posição de cada um dos eixos do *scanner* galvanométrico. A informação de posicionamento real dos eixos lineares também é obtida de cada *drive*. Todos esses sinais de realimentação permitem ao *software* estabelecer a posição no qual o ponto focal do *laser* se encontrar e determinar o comando para emissão ou desligamento da fonte *laser*.

Na primeira configuração os sinais de posição são enviados para o *scanner* galvanométrico, cuja a eletrônica inserida em seu interior realiza a movimentação dos espelhos, mas não retorna à posição atingida pelos mesmos. Na segunda abordagem o movimento é comandado pelo controlador do *scanner* galvanométrico, que por sua vez obtém a posição real dos espelhos e consegue transferi-la para o *software* de controle. Esta diferença permite a configuração Aerotech ter sincronização mais exata entre a posição do *scanner* galvanométrico e dos eixos lineares.

5. USO DE LASER CONTÍNUO E PULSADO

Para ambos os tipos de *lasers* são exigidos sistemas de controle quando utilizados com *scanners* galvanométricos e eixos de movimentação, contudo algumas particularidades são destacadas. *laser* contínuo requer um controle da potência entregue e *laser* pulsado demanda a sincronização do movimento com os pulsos *laser* ou um controle adaptativo da frequência destes pulsos (Martinov et al., 2014)

Ao modular a potência do *laser* em função da velocidade de varredura é possível obter uma densidade de energia constante nos momentos de aceleração e desaceleração do *scanner* (Luo et al., 2017). Nos processos de tratamento de superfície a movimentação do feixe *laser* pelo *scanner* é combinada com a modulação de potência do *laser* para alterar as condições da poça fundida. As alterações são resultado da variação dos parâmetros mais relevantes, como a potência média do *laser*, a velocidade de varredura, a amplitude da potência modulada do *laser*, o comprimento de onda da modulação e o diâmetro do feixe de *laser* (Poprawe, 2011).

Na utilização de *laser* com pulsos curtos comandados pelo controle de movimento dos eixos observa-se diferentes comportamentos conforme o nível de sincronização utilizado. Quando o *laser* emite um trem de pulsos no início da aceleração do eixo a distância entre os pontos atingidos varia conforme o eixo atinge sua velocidade programada (Fig. (9)a). Uma estratégia conhecida como “*sky-writing*”, segundo Jaeggi et al., (2013) consiste em iniciar a emissão quando os eixos já estão em uma velocidade correta mantendo a distância pretendida entre os pontos (Fig. (9)b). No entanto para garantir a exatidão de posição de diferentes segmentos de linha é necessário sincronizar o trem de pulsos do *laser* com a movimentação dos eixos (Fig. (9)c)

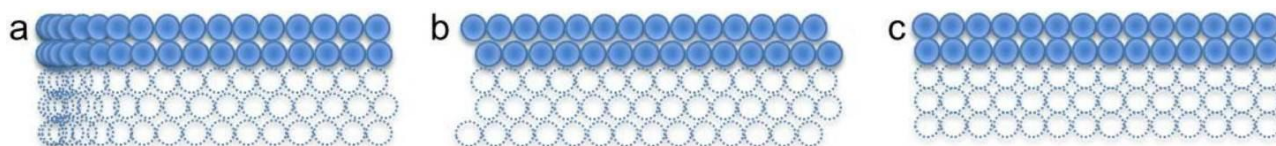


Figura 9. Posição de início com diferentes estratégias: sem *sky-writing* (a), com *sky-writing* (b) e sincronizada (c) (Jaeggi et al., 2013).

Uma das funcionalidades adotadas por Aerotech (2016) é disponibilizar um sinal de saída sincronizado com a posição atual do feixe *laser*. A saída de posição sincronizada (PSO – *Position Synchronized Output*) gera um sinal sincronizado com a realimentação de posição do *scanner* e pode ser utilizada para acionar o *laser*. A sincronização permite estabelecer uma frequência de repetição de pulsos de acordo com a posição e a velocidade de varredura. Caso a taxa de repetição dos pulsos seja constante, a variação de velocidade irá interferir na sobreposição da incidência do *laser* sobre o material processado. Esse comportamento é evidenciado na Fig. (10). A máxima frequência obtida em uma saída PSO diferencial situa-se em 5 MHz, sendo a faixa típica dos *lasers* pulsados de fs e ps operam com taxas de repetição de centenas de kHz a alguns MHz (Niso et al., 2013), muito embora *laser* com GHz sejam listados para uso no processamento de materiais (Tang et al., 2014).

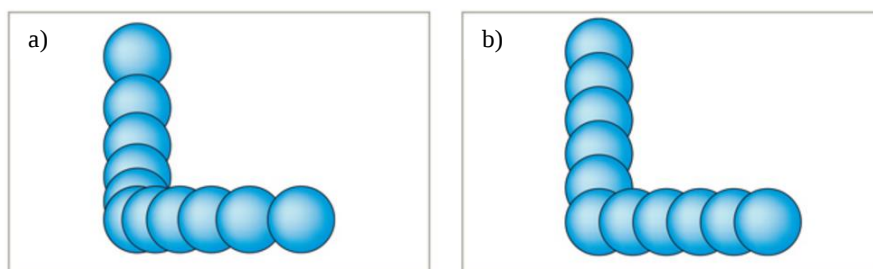


Figura 10. Comparação do uso de *laser* pulsado em *scanner* sem (a) e com (b) posição sincronizada (Aerotech, 2016).

Uma característica de algumas fontes *laser* pulsadas é que a emissão dos pulsos é baseada em uma frequência interna (*clock*) que não pode ser modificada para atuar de forma síncrona com um comando externo. Uma maneira de trabalhar com essa condição é estabelecer uma relação entre o *clock* do *laser* e o comando externo. Nesta abordagem a largura de pulso do comando externo é configurada para ter a mesma largura do *clock* do *laser* (Aerotech, 2013), isto garante que o sinal de comando externo estará ativo no momento em que o *laser* pode ser acionado (geralmente na borda de subida ou decida do *clock*). No entanto, a tolerância do sincronismo entre os sinais pode ocasionar pulsos extras caso a largura do sinal de comando seja maior que a largura do *clock* do *laser* ou perda de pulsos na condição inversa.

Devido as exigências de qualidade para determinados processamentos de materiais os parâmetros do *laser* têm sido constantemente otimizados. Para processos de usinagem a *laser* as taxas de remoção de material são melhoradas quando a largura do pulso é reduzida a ordem de femtosegundos (Neuenschwander et al., 2012). Consequentemente a utilização de *lasers* de ps e fs representam o emprego de pulsos ultracurtos e elevadas taxas de repetição (acima de MHz), que por sua vez demandam mais velocidade nos sistemas de entrega de *laser*.

A escalada nos valores comercialmente disponíveis de potência, taxa de repetição e duração de pulso de fontes *laser* representam a exigência de velocidade de escaneamento superiores a encontrada na maioria dos *scanners* galvanométricos. Uma forma de alcançar maiores velocidades é o uso de movimentação sincronizada de eixos lineares com *scanners* poligonais, possibilitando velocidade de 50 m/s para um *laser* com taxa de repetição de 1 MHz (De Loor, 2013). Neste caso o *scanner* poligonal promove uma varredura em linha de alta velocidade e o eixo linear permite a movimentação perpendicular a esta linha, resultando em um sistema de varredura 2D.

6. CONCLUSÃO

O processamento de materiais com *laser* pode usufruir das características existentes em equipamentos com a movimentação em modo *on-the-fly* como a elevada velocidade e aceleração conferida pelos *scanners* galvanométricos e a grande área de alcance dos eixos lineares. Contudo a qualidade do resultado final depende da exatidão de sincronismo existe entre os elementos que compõem o sistema.

A compensação dos erros de não linearidade inerente ao uso dos espelhos galvanômetros e das ópticas para condicionamento do feixe também é necessária. As limitações ópticas também estão associadas ao limiar de danos dos espelhos e seus revestimentos, o que limita os níveis de densidade de energia de *laser* que podem ser conduzidos pelos *scanners* galvanométricos.

Para a utilização de *laser* com emissão contínua é requerido o controle da potência entregue para obter a mesma condição de energia em pontos com variação da velocidade de varredura. No uso de *laser* pulsado a exigência primordial é o sincronismo da frequência de pulsos com o posicionamento dado pelo sistema *on-the-fly*. Devido a escalada de desempenho de fontes *laser* disponíveis comercialmente continuará crescente a busca por maiores velocidades e acelerações para o processamento de materiais

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP - LASER), à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo apoio na realização deste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- Aerotech. (2013), “Synchronizing Position Synchronized Output (PSO) with Mode-Locked Lasers”, available at: https://www.aerotech.com/media/430780/aerotech_synchronizing_pso_with_mode-locked_lasers.pdf (accessed 23 November 2016).
- Aerotech. (2016), “Nmark GCL High-Performance Galvo Control”, available at: <https://www.aerotech.com/product-catalog/drives-and-drive-racks/nmark-gcl.aspx> (accessed 22 November 2016).
- Altintas, Y., Verl, a., Brecher, C., Uriarte, L. and Pritschow, G. (2011), “Machine tool feed drives”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, CIRP, Vol. 60 No. 2, pp. 779–796.
- Brown, D. (2009), “Optics for scanning: Rapid scanning applications drive mirror design”, *LaserFocusWorld*, Tulsa, available at: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-45/issue-3/features/optics-for-scanning-rapid-scanning-applications-drive-mirror-design.html>.
- Chen, M.-F., Chen, Y.-P., Hsiao, W.-T., Wu, S.-Y., Hu, C.-W. and Gu, Z.-P. (2008), “A scribing laser marking system using DSP controller”, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 46 No. 5, pp. 410–418.
- Dold, C., Eberle, G., Jefimovs, K., Axtner, M., Pude, F. and Wegener, K. (2011), “Analysis of Damage Thresholds of Laser Scanning Mirrors using Ultrashort Laser Pulses”, *Physics Procedia*, Vol. 12, pp. 445–451.
- Favrat, O., Sozet, M., Toven-Pécault, I., Lamaignère, L. and Néauport, J. (2014), “Influence of organic contamination on laser induced damage of multilayer dielectric mirrors by subpicosecond laser pulses”, *Proc. SPIE 9237, Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2014*, 923707, available at: <https://doi.org/10.1117/12.2067902>.
- Han, K., Song, R., Xu, X. and Liu, Z. (2016), “Influence of the contaminant size on the thermal damage of optical

- mirrors used in high energy laser system”, *Proc. SPIE 9952, Systems Contamination: Prediction, Control, and Performance 2016*, 99520M, available at: <https://doi.org/10.1117/12.2236773>.
- Jaeggi, B., Neuenschwander, B., Meier, T., Zimmermann, M. and Hennig, G. (2013), “High Precision Surface Structuring with Ultra-Short Laser Pulses and Synchronized Mechanical Axes”, *Physics Procedia*, Vol. 41, pp. 319–326.
- Kacperski, D., Wlodarczyk, M. and Grabowski, K. (2015), “Custom design of galvanometric motor for large mirror”, *2015 22nd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits Systems (MIXDES)*, pp. 618–623.
- Kim, K., Yoon, K., Suh, J. and Lee, J. (2011), “Laser Scanner Stage On-The-Fly Method for ultrafast and wide Area Fabrication”, *Physics Procedia*, Vol. 12, pp. 452–458.
- Li, Y. (2008), “Beam deflection and scanning by two-mirror and two-axis systems of different architectures: a unified approach”, *Appl. Opt.*, OSA, Vol. 47 No. 32, pp. 5976–5985.
- De Loor, R. (2013), “Polygon scanner system for ultra short pulsed laser micro-machining applications”, *Physics Procedia*, Elsevier Srl, Vol. 41, pp. 544–551.
- Luo, X., Li, J. and Lucas, M. (2017), “Galvanometer scanning technology for laser additive manufacturing”, in Gu, B., Helvajian, H., Piqué, A., Dunskey, C.M. and Liu, J. (Eds.), *Proc. SPIE 10095, Laser 3D Manufacturing IV*, available at: <https://doi.org/10.1117/12.2252973>.
- Marshall, G. and Stutz, G. (2011), “Handbook of Optical and Laser Scanning, Performance, and Design”, *Handbook of Optical and Laser Scanning, Second Edition*, Vol. 20112767, CRC Press, pp. 247–279.
- Martinov, G.M., Obuhov, A.I., Martinova, L.I. and Grigoriev, A.S. (2014), “An approach to building specialized CNC systems for non-traditional processes”, *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., Vol. 14, pp. 511–516.
- Moriwaki, T. (2008), “Multi-functional machine tool”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 57 No. 2, pp. 736–749.
- Neuenschwander, B., Jaeggi, B., Schmid, M., Rouffange, V. and Martin, P.-E. (2012), “Optimization of the volume ablation rate for metals at different laser pulse-durations from ps to fs”, *Proc. SPIE 8243, Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVII*, 824307, available at: <https://doi.org/10.1117/12.908583>.
- Newport. (2013), “Using Newport XPS Universal Controller For Control of Galvo Scanner Head”, Irvine, available at: https://www.newport.com/medias/sys_master/images/hba/he1/8797213491230/Motion-Tech-Note-XPS-Control-of-Galvo-Scanner.pdf (accessed 16 November 2016).
- Niso, F. Di, Gaudiuso, C., Sibillano, T., Mezzapesa, F.P., Ancona, A. and Lugarà, P.M. (2013), “Influence of the Repetition Rate and Pulse Duration on the Incubation Effect in Multiple-Shots Ultrafast Laser Ablation of Steel”, *Physics Procedia*, Vol. 41, pp. 698–707.
- Poprawe, R. (Ed.). (2011), *Tailored Light 2: Laser Application Technology*, 1st ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01237-2>.
- Sintetic Optronics. (2016), “Laser Marking Heads (Laser Scanners, Optical Scanners, Scan Heads)”, available at: <http://www.sintecoptronics.com/markingshead.asp> (accessed 24 November 2016).
- Tang, D.Y., Guo, J., Song, Y.F., Li, L., Zhao, L.M. and Shen, D.Y. (2014), “GHz pulse train generation in fiber lasers by cavity induced modulation instability”, *Optical Fiber Technology*, Vol. 20 No. 6, pp. 610–614.
- Wagner, F.R., Melninkaitis, A., Batavičiūtė, G., Gouldieff, C., Smalakys, L., Beaudier, A. and Natoli, J.-Y. (2015), “Characterization of damage precursor density from laser damage probability measurements with non-Gaussian beams”, *Proc. SPIE 9632, Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2015*, 96321O, p. 96321O.
- Yang, P.-M., Lo, Y.-L. and Chang, Y.-H. (2016), “Laser galvanometric scanning system for improved average power uniformity and larger scanning area”, *Applied Optics*, OSA, Vol. 55 No. 19, p. 5001.
- Zimmermann, M. and Schmidt, M. (2011), “Combination of a micro-lens multi-spot generator with a galvanometer scanner for flexible parallel micromachining of silicon”, *Proc. SPIE 8130, Laser Beam Shaping XII*, 81300O, available at: <https://doi.org/10.1117/12.892679>.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste artigo.

ON-THE-FLY PROCESSING OF MATERIALS BY LASER

Claudio Abilio da Silveira, claudio.silveira@posgrad.ufsc.br¹

Walter Lindolfo Weingaertner, w.l.weingaertner@ufsc.br¹

Milton Pereira, milton.pereira@ufsc.br¹

¹ Univesidade Federal de Santa Catarina, Campus Reitor João David Ferreira Lima, Florianópolis - SC, 88040-900.

Abstract: *The processing of materials with laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) depends not only on optical characteristics, but also on the devices that facilitate its delivery. The relative movement between the laser beam and the processing point may rely on different devices to be executed. The translative linear axes allow the movement and orientation of the beam, however, they can present speed and accuracy that limit the potentiality of laser. In galvanometer heads the movement of the mirrors allows the steering at high speeds, but due to inherent characteristics the beam's reach on a plane does not usually exceed a few hundred millimeters. However, these two laser delivery devices can be combined to enjoy particular advantages such as high speed movement (provided by the galvanometer head) extended over a large range (defined by the linear axes). This article presents the characteristics found in systems with synchronous movement between galvanometric head and linear axes, also called on-the-fly systems, applied in the processing of materials with laser. In moving the on-the-fly type occurs the simultaneous movement of the devices and not only discrete displacements. Aspects such as speed, accuracy and limitations are discussed. The strategies for the use of galvanometric heads and characteristics of the laser beam as power, energy density and morphology are also mentioned. It also includes the necessary requirements to ensure the operation of on-the-fly systems with continuous and pulsed emission laser. It is concluded that the combined handling of galvanometric heads and linear axes maximizes and expands the use of laser in the processing of materials, however, it presents a strong dependence on the integration between the components used for a result of excellence.*

Keywords: *on-the-fly, galvanometer scanner, galvo, laser, materials processing..*