

# DESENVOLVIMENTO ATUAL E TENDÊNCIAS FUTURAS EM MÁQUINAS DE CINEMÁTICA PARALELA

**Tarcisio Antonio Hess Coelho**

Departamento de Engenharia Mecatrônica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, São Paulo, SP, CEP 05508-900, tarchess@usp.br

**Guilherme Raszl**

Centro Universitário da FEI, UniFEI, Fundação Educacional Inaciana Pe Sabóia de Medeiros. Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972 – bairro Assunção, CEP 09850-901 – São Bernardo do Campo, SP - C.P. 596, graszl@fei.edu.br

***Resumo.** Durante a última década, tanto a comunidade acadêmica como industrial tem demonstrado um grande empenho em desenvolver máquinas-ferramentas e manipuladores robóticos baseados numa nova e promissora arquitetura denominada Máquina de Cinemática Paralela (MCP). Nesta arquitetura, uma plataforma móvel, que sustenta uma ferramenta de corte ou uma garra, é conectada a uma base fixa por meio de pelo menos dois membros independentes ou pernas. As principais vantagens potenciais das máquinas de cinemática paralela, quando comparadas com a sua concorrente serial, são elevada capacidade de carga, rigidez, e uma resposta dinâmica mais rápida. Após muitos anos de pesquisa fundamental, máquinas de cinemática paralela direcionadas para aplicações industriais já estão no mercado. Este artigo descreve as principais características de algumas MCPs e outros protótipos ainda na fase de desenvolvimento. O trabalho também trata de algumas questões importantes relativas ao desenvolvimento de tais máquinas e enumera possíveis tendências futuras.*

***Palavras-chave:** máquinas-ferramentas, cinemática paralela*

## 1. INTRODUÇÃO

A maioria das máquinas-ferramentas convencionais, para operações de fresamento, realizam o processo de usinagem ao longo de três eixos ortogonais. Desta forma, as estruturas destas máquinas geralmente se enquadram em três categorias, brevemente descritas a seguir. Nas estruturas do tipo “C” (fig.1a), a peça de trabalho se move ao longo dos eixos longitudinal, transversal e vertical e a ferramenta permanece estacionária (somente gira). Em estruturas pórtico (fig.1b), tanto a peça de trabalho como a ferramenta se movimentam: a peça se desloca ao longo do eixo longitudinal e a ferramenta, ao longo dos eixos transversal e vertical. Por outro lado, as estruturas do tipo “pórtico móvel” (fig.1c) são mais adequadas para peças de grande porte e, como consequência, somente a ferramenta se move ao longo dos três eixos.

Enquanto as máquinas-ferramentas convencionais apresentam uma estrutura com eixos de movimentação ortogonais numa arquitetura serial, as *Máquinas de Cinemática Paralela* (MCP) apresentam estruturas multi-pernas (fig.2) que se caracterizam por um esquema de atuação simultânea ou paralela sobre a plataforma móvel que geralmente transporta a ferramenta. Esta arquitetura não-convencional torna-se atraente devido a algumas vantagens potenciais sobre a tradicional serial. Dentre elas podem-se mencionar: alta rigidez, leveza, elevada resposta dinâmica,

precisão e alta capacidade de carga. Este artigo trata do desenvolvimento atual e as tendências futuras relativas às MCPs.

A seção 2 descreve MCPs disponíveis comercialmente e apresenta uma comparação entre elas. Na seção seguinte, são enumeradas as suas aplicações industriais. A seção 4 discute as tendências futuras relativas ao projeto, os componentes e a calibração de MCPs.

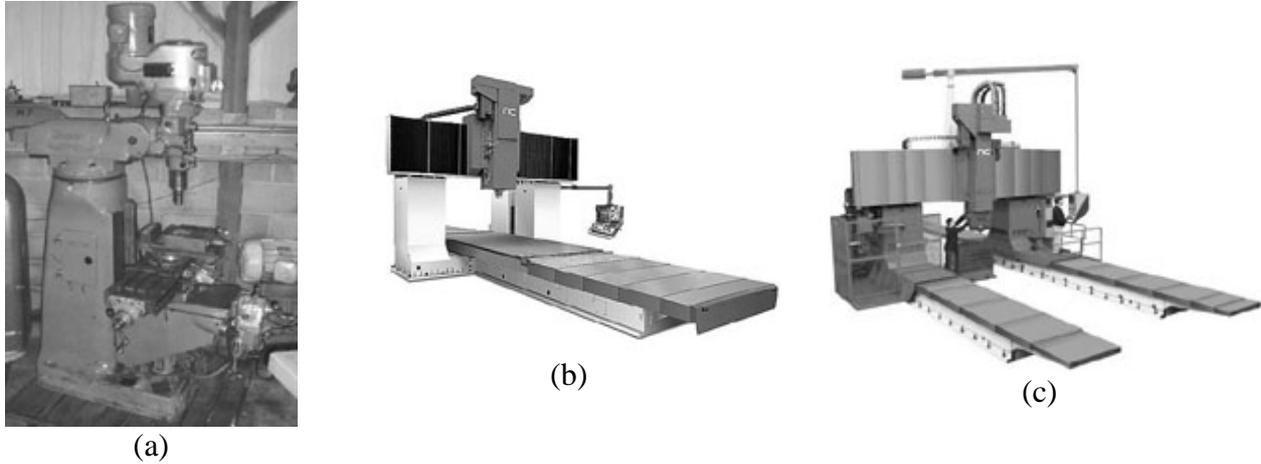


Figura 1. Tipos de estruturas empregadas em máquinas-ferramentas convencionais: (a) “C”, (b) pórtico e (c) pórtico móvel

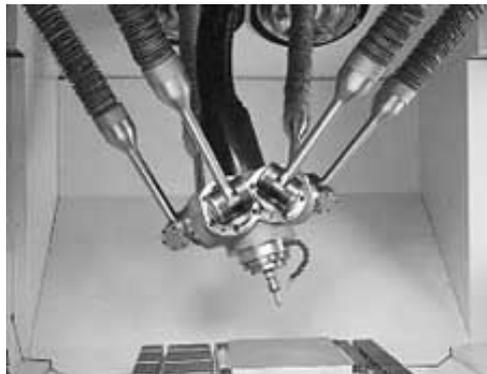


Figura 2. Máquina de Cinemática Paralela (MCP)

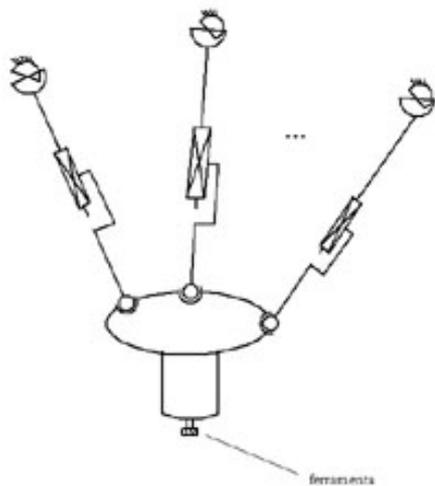


Figura 3. Estrutura Cinemática com pernas de comprimento variável

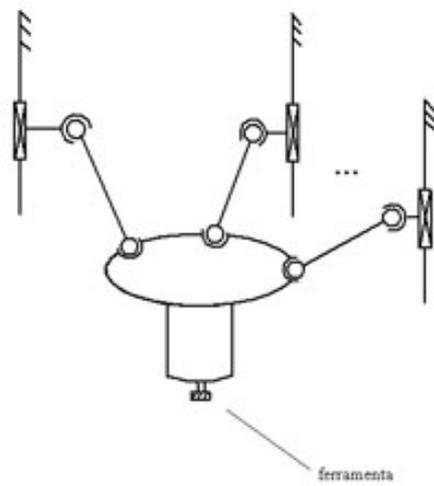


Figura 4. Estrutura Cinemática com pernas de comprimento fixo

## 2. DESCRIÇÃO E COMPARAÇÃO ENTRE MÁQUINAS DE CINEMÁTICA PARALELA

As máquinas de cinemática paralela se baseiam em estruturas cinemáticas que podem ser classificadas em duas categorias: as estruturas formadas por pernas de comprimento variável (fig.3) ou por pernas de comprimento fixo (fig.4). Em ambas situações, o movimento das juntas prismáticas é obtido por meio de atuadores rotativos acoplados a fusos de esferas recirculantes, que provocam o movimento de um bloco deslizante. No caso em que as pernas possuem comprimento fixo, as carcaças dos motores estão vinculadas à base (que corresponde à região hachurada na fig.4), enquanto que em estruturas com pernas de comprimento variável, as carcaças dos motores realizam movimento de rotação em torno de juntas universais ou eventualmente esféricas.

### 2.1. Descrição

A seguir, serão apresentadas breves descrições sobre as características de máquinas paralelas, em sua maioria, bem como máquinas com arquitetura convencional.

Arrow 1000 (AR), apresentada na fig.5, é uma máquina CNC com eixo vertical de giro da ferramenta, tipo “C”, de 3 eixos de usinagem, fabricada pela empresa norte-americana Cincinnati<sup>(1)</sup>. CMW 300 (CM), fig.6, é uma estrutura paralela hexápode, com pernas de comprimento variável, que permite fresamento de alta precisão em 5 eixos, desenvolvida em cooperação entre o INRIA e a empresa francesa CMW<sup>(2)</sup> Constructions Mecaniques des Vosges Marioni.



Figura 5. Arrow 1000 (AR)

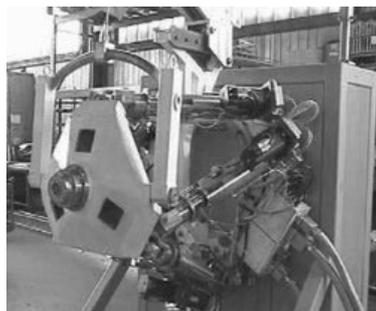


Figura 6. CMW 300 (CM)



Figura 7. Ecospeed (ES)

Ecospeed (ES), é uma estrutura híbrida, ou seja, em parte é paralela e em parte é serial. A porção paralela é formada pelo Sprint Z3 (fig.7), com pernas de comprimento fixo, que permite movimentação em 3 eixos, juntamente com a porção serial que consiste de 2 trilhos sobrepostos e, desta forma, proporcionando 5 eixos de usinagem no total. Desenvolvida para fresamento de alta velocidade de componentes estruturais de aeronaves, é fabricada pela empresa alemã DS Technologie<sup>(3)</sup>.



Figura 8. Eclipse (EC)

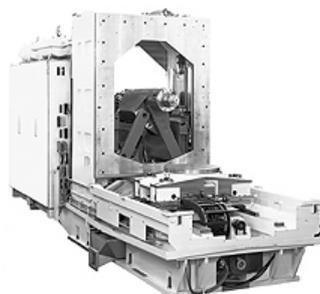


Figura 9. Genius 500 (GN)



Figura 10. HexaM (HM)

Eclipse (EC), fig.8, é uma estrutura híbrida redundante, com 8 atuadores, que permite fresamento em 5 faces além de torneamento, foi desenvolvida pela Universidade Nacional de Seul<sup>(4)</sup> em cooperação com a empresa Daeyoung, visando a usinagem em tempo mínimo de preparação. Genius 500 (GN), fig.9, é uma estrutura híbrida, sendo a porção paralela constituída de pernas de

comprimento fixo, responsável pelo posicionamento da ferramenta em duas direções no plano vertical, juntamente com a porção serial formada por uma mesa de translação para aproximação da peça de trabalho. Apresentando elevado desempenho dinâmico, desenvolve altíssimas velocidades de movimentação e é fabricada pela empresa Cross-Hueller<sup>(5)</sup> do grupo alemão Thyssen-Krupp. HexaM (HM), fig.10, é uma estrutura paralela hexápode, com pernas de comprimento fixo, que permite fresamento em 5 eixos, é fabricada pela empresa japonesa Toyoda<sup>(6)</sup>.

Ingersoll VOH 1000 (IV), fig.11, é uma estrutura paralela hexápode, com pernas de comprimento variável, que permite fresamento em 5 eixos, desenvolvida pela empresa americana Ingersoll<sup>(7)</sup>. Metrom P 2000 (M), fig.12, é uma estrutura híbrida, sendo que a porção paralela é pentápode, com pernas de comprimento variável, responsável pelo posicionamento da ferramenta, juntamente com a porção serial formada por uma mesa giratória que sustenta a peça de trabalho. É fabricada pela empresa alemã Metrom<sup>(8)</sup>. Quickstep (QS), fig.13, é uma estrutura paralela, consiste num tripé, com pernas de comprimento fixo. Permite usinagem em 3 eixos e é fabricada pela empresa austríaca Krause & Mauser<sup>(9)</sup>.



Figura 11. Ingersoll VOH 1000 (IV)

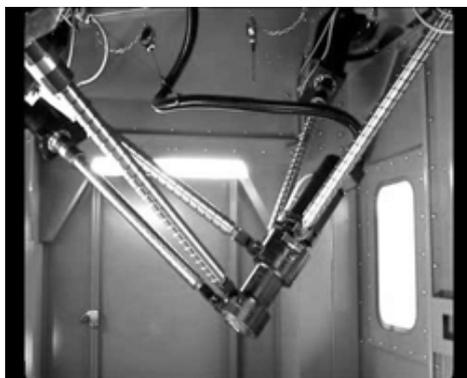


Figura 12. Metrom (M)



Figura 13. Quickstep (QS)

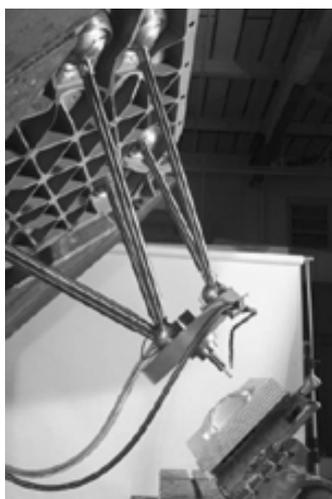


Figura 14. Tornado Hexel (TD)

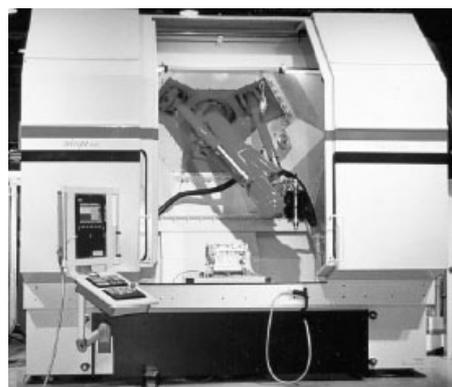


Figura 15. Tricept SMT 805 (TC)



Figura 16. Ulysses (UL)

Tornado Hexel (TD), fig.14, é uma estrutura paralela hexápode, com pernas de comprimento variável, que permite fresamento em 5 eixos, desenvolvida pela empresa americana Hexel<sup>(10)</sup>. Tricept SMT 805 (TC), fig.15, é uma estrutura híbrida, onde a porção paralela é tetrápode, com pernas de comprimento variável, juntamente com a porção serial responsável pela orientação da ferramenta, totalizando 5 eixos de fresamento. Permite usinagem em 5 faces, podendo ser utilizada também para operações de corte e soldagem. É fabricada pela empresa sueca SMT<sup>(11)</sup>. Ulysses

(UL), fig.16, é uma estrutura paralela, onde a porção paralela consiste num tripé para posicionamento da ferramenta, permitindo a usinagem em 3 eixos. É fabricada pela empresa espanhola Fatronik<sup>(12)</sup>.

Variax (VX), fig.17, é uma estrutura paralela hexápode, com pernas de comprimento variável, que permite fresamento em 5 eixos, desenvolvida pela empresa Giddings & Lewis do grupo alemão Thyssen-Krupp<sup>(13)</sup>. VMC 135E (V), fig.18, é uma máquina CNC com eixo vertical de giro da ferramenta, tipo “C”, de 3 eixos de usinagem, fabricada pela empresa indiana Associated Technocrats<sup>(14)</sup>.

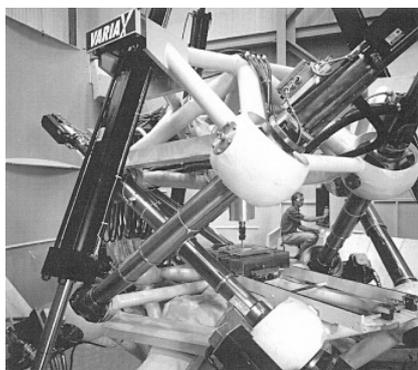


Figura 17. Variax (VX)



Figura 18. VMC 135E (V)

## 2.2. Comparação

A comparação entre as máquinas descritas na seção 2.1 considerará os seguintes critérios: tipo de arquitetura, a precisão, dinâmica, eficiência no aproveitamento da região ocupada e capacidade angular. Quanto ao tipo de arquitetura, as tabelas 1, 2 e 3 apresentam a classificação das máquinas conforme sua cinemática, o número de eixos de usinagem e estrutura espacial, respectivamente.

Tabela 1 – Classificação das máquinas conforme a sua cinemática

Cinemática	Máquina
Serial	AR, V
Paralela	CM, HM, IV, QS, TD, VX, UL
Híbrida (paralela e serial)	EC, ES, GN, M, TC

Tabela 2 – Classificação das máquinas de acordo com o número de eixos de usinagem

No. de eixos	Máquina
3	AR, GN, QS, UL, V
5	ES, TC, CM, EC, HM, M, TD, VX

De acordo com este primeiro critério, observa-se que, dentre as máquinas com arquitetura não convencional, há uma predominância das máquinas de cinemática paralela sobre as híbridas. Além disto, o número de eixos de usinagem disponibilizados por estas máquinas é geralmente cinco. Quanto ao tipo de estrutura, as máquinas não-convencionais adotam estrutura em tripé ou hexápode.

Tabela 3 – Classificação das máquinas conforme a sua estrutura

Estrutura	Máquina
C	AR, V
Bípede	GN
Tripé	EC, ES, QS, UL
Tetrápode	TC
Pentápode	M
Hexápode	HM, CM, IV, TD, VX

A precisão de uma máquina relaciona-se diretamente com a qualidade requerida do produto a ser fabricado (peça de trabalho). Os gráficos das figuras 19 e 20 apresentam, respectivamente, a acurácia e a repetibilidade das máquinas convencionais, paralelas e híbridas. Nota-se que as máquinas Arrow 1000 (AR) e VMC135E (V), convencionais, demonstram desempenho superior que a maioria das máquinas paralelas e híbridas. Apenas a HexaM (HM) e CMW300 (CM) se aproximam, respectivamente, da acurácia e repetibilidade das convencionais.

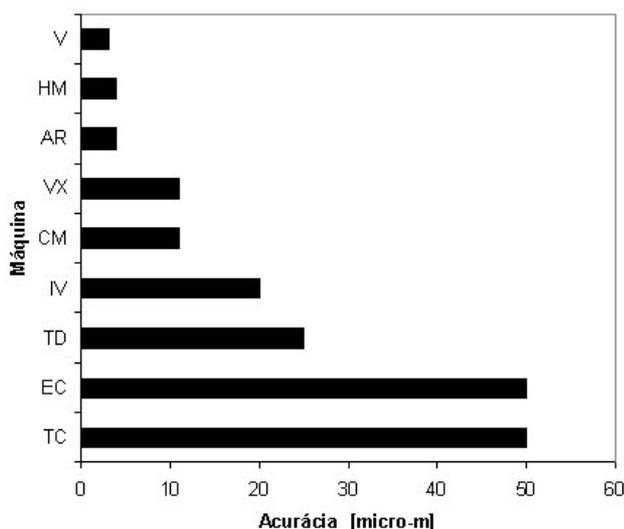


Figura 19. Acurácia

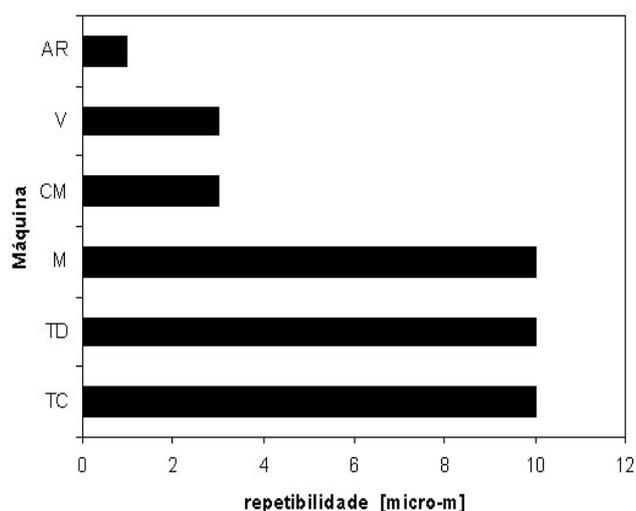


Figura 20. Repetibilidade

A dinâmica da máquina representa a sua capacidade em realizar a fabricação de um determinado produto no menor tempo possível. Tal característica reflete tanto os movimentos de aproximação da ferramenta para início da operação, quanto os avanços na operação de usinagem. A dinâmica significa, portanto, alta produtividade e é um dos grandes atrativos oferecido pelos fabricantes. Os gráficos das figuras 21 e 22 apresentam, respectivamente, a máxima velocidade de avanço e aceleração dos eixos de usinagem das máquinas comparadas.

Observa-se claramente que tanto a velocidade de avanço como a aceleração são as grandes virtudes das máquinas paralelas e híbridas se comparadas com as máquinas convencionais. Com relação à velocidade de avanço (que engloba tanto a situação da usinagem propriamente dita como a aproximação entre ferramenta e peça), a superioridade da maioria das máquinas não-convencionais varia de duas, caso da Tricept SMT 805 (TC) e Ecospeed (ES), a seis vezes maior, alcançada apenas pela Genius 500 (GN), que as Arrow 1000 (AR) e VMC135E (V). A aceleração das máquinas de arquitetura tradicional não é um atributo comumente registrado pelos seus fabricantes. Por outro lado, há pelo menos sete máquinas, entre híbridas e paralelas cujas acelerações estão entre

10 e 24 m/s<sup>2</sup>. A razão para o extraordinário desempenho destas máquinas deve-se à localização dos seus atuadores, que normalmente são instalados na ou junto à base.

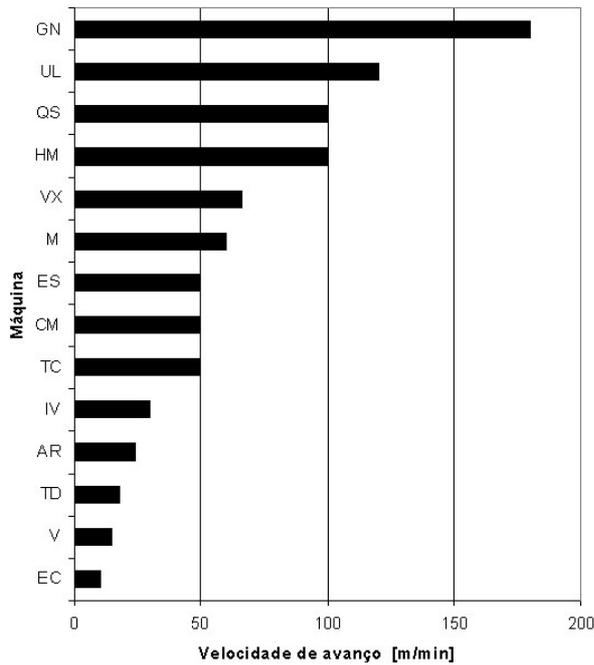


Figura 21. Velocidade de avanço

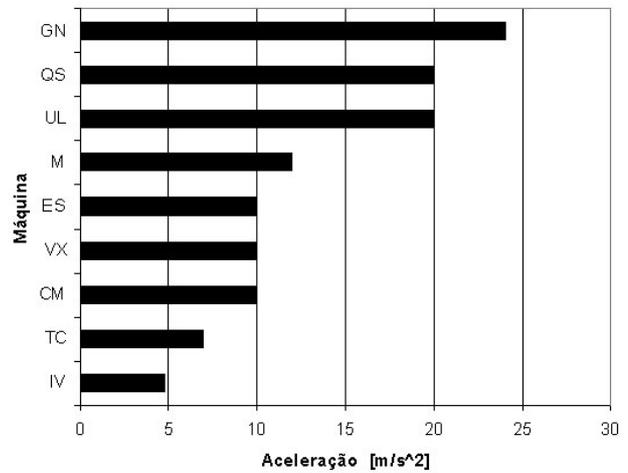


Figura 22. Aceleração

Outro critério de comparação é a eficiência no aproveitamento da região ocupada. As figuras 23 e 24 apresentam, respectivamente, os gráficos do espaço de trabalho e da razão entre o espaço de trabalho e área ocupada (“footprint”). O espaço de trabalho representa o volume alcançado pela ferramenta de corte. Observa-se quanto a esta característica que a maioria das máquinas híbridas demonstram desempenho comparável às máquinas seriais. Contudo, esta vantagem se evidencia mais ainda quando se considera a razão entre espaço de trabalho e área ocupada. As máquinas híbridas Tricept SMT 805 (TC) e Metrom 2000 (M) alcançam razões da ordem de 6 a 8 vezes superior à Arrow 1000 (AR).

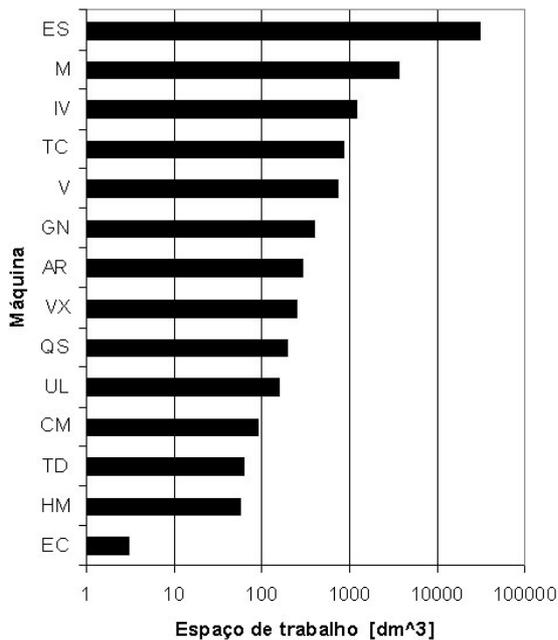


Figura 23. Espaço de trabalho

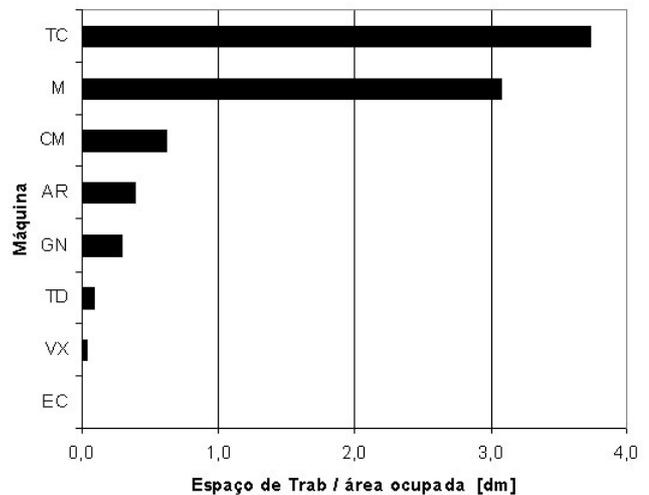


Figura 24. Razão entre espaço de trabalho e área ocupada

Considera-se a capacidade angular de uma máquina-ferramenta como o deslocamento angular máximo alcançado pela ferramenta em relação à superfície da peça de trabalho. Tal atributo garante a execução de um número maior de operações, permitindo acesso a um número maior de faces da peça de trabalho, conferindo inclusive contornos de geometria complexa, em uma única preparação (“setup”). Como consequência, há economia de tempo de execução e redução do número de ferramentas no magazine o que possibilita a otimização da produção como um todo.

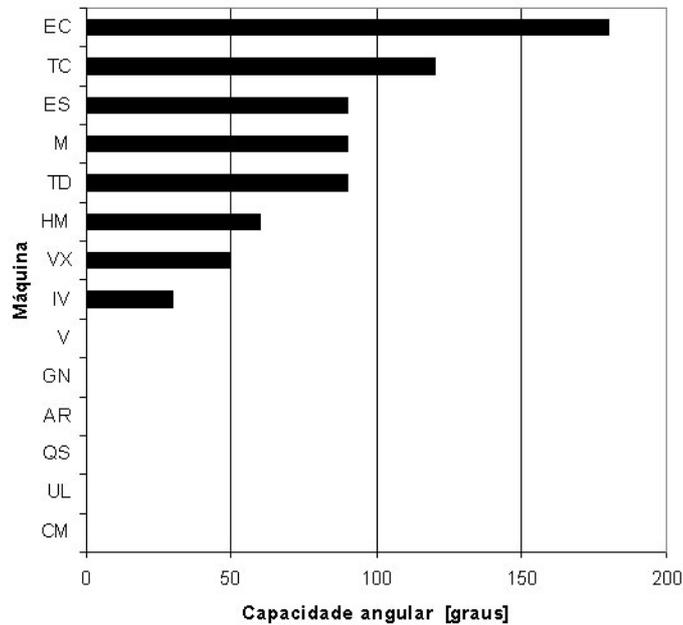


Figura 25. Capacidade angular

De acordo com a figura 25, que apresenta a capacidade angular de todas as máquinas comparadas, observa-se que a maioria das máquinas híbridas e algumas paralelas apresentam capacidade angular que varia de 35 a 180 graus. O melhor desempenho foi alcançado pela máquina Eclipse (EC).

### 3. APLICAÇÕES

Quanto às suas aplicações, observa-se atualmente a utilização crescente das MCPs na indústria em geral, com destaque especial para a automobilística e aeroespacial. Os processos de fabricação envolvem usinagem, corte, soldagem e rebiteagem.

Na indústria automobilística, destaca-se a usinagem de moldes e machos para futura conformação de chapas e a consequente geração de elementos de geometria complexa, tais como portas, capôs, etc. Além disto, a usinagem de desbaste e acabamento em diversas partes do chassi de veículos, bem como nos blocos de motores.

A indústria aeroespacial está ligada à fabricação de propulsores e, conseqüentemente, de seus componentes como pás de hélice de turbina, rotores e outros itens que requerem longas usinagens de contorno e, desta forma, a geração de peças completas com perfis geométricos complexos. Deve-se destacar também a furação, soldagem e rebiteagem em peças enormes como as asas de aeronaves.

Para melhor avaliação das aplicações das máquinas descritas na seção anterior, foram elaboradas as tabelas 4 e 5 que tratam, respectivamente, dos processos de fabricação na indústria em geral e aeroespacial.

Tabela 4. Processos na indústria em geral

Processo	Operação	Máquinas
Usinagem	Fresamento	Desbaste (aço e fundidos)
		Acabamento (produtos pré-usinados)
	Torneamento	
	Furação	
	Rebarbação	
	Polimento	
Corte		
Soldagem		

Tabela 5. Processos na indústria aeroespacial

Processo	Operação	Máquinas
Usinagem	Fresamento	Desbaste
	Furação	
	Rebarbação	
Rebitagem		

#### 4. TENDÊNCIAS FUTURAS

Podemos identificar que as tendências futuras para o desenvolvimento das MCPs se concentram em três frentes: projeto, componentes e calibração.

Com relação ao projeto, nota-se que as arquiteturas mais recentes se baseiam em estruturas paralelas que permitem a usinagem em 3, 4 ou até 5 eixos. A adoção destas arquiteturas, ao invés da Hexápode, resulta na utilização de sistemas de menor complexidade, que traz como consequência a simplificação no controle e a redução no seu custo por conter um número menor de componentes. Outra tendência observada é a utilização de arquiteturas híbridas, ou seja, a combinação de estruturas paralelas com seriais de modo a aproveitar os pontos favoráveis associados ao emprego destes diferentes tipos de mecanismos. Desta forma, pode-se alcançar um espaço de trabalho de translação ou orientação maior, além de, localmente, conseguir maior capacidade nominal para operações de desbaste ou acabamento, usinagem de superfícies complexas, e de até obter-se maior rapidez nas operações.

A utilização de estruturas com atuação redundante<sup>(15)</sup>, ou seja, com número de atuadores superior ao número de eixos de usinagem controlados, proporciona a expansão do espaço de trabalho disponível juntamente com a possibilidade de escolha de trajetórias alternativas para a ferramenta de corte de modo a permitir um tempo de execução menor ou ainda que a estrutura assumas configurações mais rígidas durante a operação. A otimização paramétrica de uma dada arquitetura também representa um papel bastante importante no dimensionamento de uma máquina.

As funções-objetivo a serem maximizadas avaliam, em conjunto, a sua rigidez, a primeira frequência natural e o espaço de trabalho<sup>(16)</sup>.

Com relação aos componentes, pode-se mencionar a utilização de atuadores lineares e multi-eixos<sup>(17)</sup>. Os atuadores lineares são, na verdade, motores elétricos em que o rotor translada ao invés de girar em torno do estator. Dentre os benefícios da adoção desta tecnologia encontram-se a drástica redução do número de componentes, aumento da eficiência na conversão de energia elétrica em mecânica. Os motores multi-eixos representam a quebra de um paradigma associado à maioria dos atuadores: o de que eles fornecem apenas um único tipo de movimento (rotação ou translação). Assim, há atualmente protótipos de motores bi-planos e esféricos, para introdução de duas translações e três rotações, respectivamente. Além dos atuadores, para que as máquinas paralelas atinjam desempenhos superiores, existe a necessidade de um desenvolvimento maior das juntas para conexão entre as partes móveis da máquina, tais como juntas universais e esféricas. O objetivo é desenvolver juntas mais compactas, rígidas e com pouca folga, que permitam um maior ângulo de inclinação<sup>(18)</sup>.

Outro aspecto a ser considerado é a calibração das MCPs. Observou-se que as principais fontes de erro destas máquinas estavam associadas a deformações nas pernas de origem elástica e térmica<sup>(19)</sup>. Desta forma, os fabricantes passaram a incluir dentro da rotina de controle módulos de compensação para estes efeitos. Outras fontes de erro estão ligadas à diferença entre os parâmetros geométricos utilizados no modelo de transformação cinemática e os parâmetros reais<sup>(20)</sup>, bem como à presença de folga nas juntas<sup>(21)</sup>. De modo a aferir tais máquinas, se faz necessária a combinação de um dispositivo de medição aliado a uma metodologia de calibração. Dentre os inúmeros dispositivos de medição para determinação da localização da ferramenta, podem-se mencionar o interferômetro a laser<sup>(19)</sup>, ou uma outra estrutura cinemática responsável pelas medições<sup>(22)</sup>. Uma vez que os dados tenham sido adquiridos, diversas técnicas têm sido propostas de modo a avaliar e corrigir os prováveis erros, além de automatizar o processo de calibração como um todo.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho abordou os atuais desenvolvimentos e as tendências futuras com relação às máquinas cinematicamente paralelas. Foram apresentadas doze MCPs disponíveis comercialmente e suas características foram comparadas entre si e com duas máquinas CNC convencionais. Dentre as características analisadas, podem-se mencionar a acurácia, a repetibilidade, a velocidade de movimentação de seus eixos e o espaço de trabalho. Além das suas características, foram enumeradas as aplicações mais adequadas para as indústrias em geral e, especificamente, para a aeroespacial. As tendências futuras com relação ao projeto de MCPs, aos seus componentes, bem como sua calibração foram também comentadas.

Em apenas uma década, as máquinas de cinemática paralela deixaram de ser apenas protótipos de laboratório e tornaram-se efetivamente máquinas utilizadas no chão de fábrica. Atualmente, somente algumas MCPs demonstram acurácia e repetibilidade comparáveis a máquinas CNC convencionais. No entanto, se forem consideradas as altíssimas velocidades de movimentação de seus eixos e a capacidade de usinagem de peças com geometria complexa num único “setup”, certamente veremos num futuro próximo um aumento significativo na participação desta tecnologia inovadora no processo produtivo.

## 6. REFERÊNCIAS

1. CINCINATTI. **Vertical Machining Centers: Arrow VMC-1000**. Disponível em <[http://www.cinmach.com/products/Arrow VMC-1000 Specs.htm](http://www.cinmach.com/products/Arrow_VMC-1000_Specs.htm)> . Acesso em: 9 set. 2004.
2. CMW. **Hexapode CMW 300: Basic features**. Disponível em: <<http://www.hexapode.com/english/hexa.htm>> Acesso em: 23 ago. 2004
3. DS. **Ecospeed: high speed machining center**. DS Technologie Werkzeugmaschinenbau GmbH. Disponível em: <<http://www.ds-technologie.de/v2/en/produkte/aircraft/ecospeed.php>>. Acesso em: 23 ago. 2004

4. KIM, J. et al. A New Parallel Mechanism Machine Tool Capable of Five-face Machining, **Annals of CIRP**, 1999, 5p.
5. CROSS-HUELLER. **Genius 500**. Disponível em: <<http://www.crosshueller.com/crosshueller/en/products/genius/default.php>>. Acesso em: 19 ago. 2004.
6. BONEV, Ilian. Toyota Machine Works: HexaM. **ParalleMIC, The Parallel Mechanism Information Center**. Disponível em: <<http://www.parallemic.org/WhosWho/gallery.htm>> Acesso em: 25 ago. 2004
7. BONEV, Ilian. Ingersoll: octahedral Hexapod VOH-1000. **ParalleMIC, The Parallel Mechanism Information Center**. Disponível em: <<http://www.parallemic.org/WhosWho/gallery.htm>> Acesso em: 25 ago. 2004
8. METROM. **Parallel Kinematics Five axis Milling Machine: Metrom P2000**. Metrom Mechatronische Maschinen GmbH, Chemnitz, Alemanha, 2004, 6p.
9. BONEV, Ilian. Krause & Mauser: Quickstep. **ParalleMIC, The Parallel Mechanism Information Center**. Disponível em: <<http://www.parallemic.org/WhosWho/gallery.htm>>. Acesso em: 25 ago. 2004
10. KOPFER, C. Hexapod. It's working. **MMS Online**. Disponível em: <[http://www.mmsonline.com/articles/Feature-Hexapod--it's-working.htm](http://www.mmsonline.com/articles/Feature-Hexapod-it's-working.htm)>. Acesso em: 2 ago. 2004.
11. GREDEL, H. **Robot tool project: Advanced Kinematics for manufacturing applications**. Disponível em: <[http://www.ifw.uni-hannover.de/robotool/pages/maschinen\\_pages/neos\\_TR845.html](http://www.ifw.uni-hannover.de/robotool/pages/maschinen_pages/neos_TR845.html)> Acesso em: 10 set. 2004.
12. BONEV, Ilian. Fatronik: Ulysses. **The Parallel Mechanism Information Center**. Disponível em: <<http://www.parallemic.org/WhosWho/gallery.htm>> Acesso em: 25 ago. 2004
13. CHRISP, A.G. et al.. Parallel Link Machine Tools: Simulation, Workspace Analysis and Component Positioning. **Rapid Response Aerospace Manufacture (RRAM)**. Dept. of Manufacturing Engineering and Operations Management, The University of Nottingham, England, 2001, 8p.
14. ASSOCIATED TECHNOCRATS. **Machining centers: heavy duty high performance**. Disponível em: <[http://www.atponline.com/maximart\\_vmc\\_specs.htm](http://www.atponline.com/maximart_vmc_specs.htm)>. Acesso em: 2 ago. 2004.
15. VALASEK, M. et al. The Innovative Potential of Redundantly actuated PKM. In: **Parallel Kinematic Machines in Research and Practice**. The 4<sup>th</sup> Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. PKS 2004. Proceedings. Edited by Prof. Dr. Reimund Neugebauer. Chemnitz, Alemanha, 2004, p365-384.
16. HEISEL, U. et al. A workspace-oriented optimized design of hexapod machine tools. In: **Parallel Kinematic Machines in Research and Practice**. The 4<sup>th</sup> Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. PKS 2004. Proceedings. Edited by Prof. Dr. Reimund Neugebauer. Chemnitz, Alemanha, 2004, p467-484.
17. NEUGEBAUER, R. et al. Structure Design and Optimization of Parallel Kinematics. In: **Parallel Kinematic Machines in Research and Practice**. The 4<sup>th</sup> Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. PKS 2004. Proceedings. Edited by Prof. Dr. Reimund Neugebauer. Chemnitz, Alemanha, 2004, p15-45.
18. SCHNYDER, M. et al. Spherical joints with 3 and 4 degrees of freedom for 5-axis Parallel Kinematic Machine tool. In: **Parallel Kinematic Machines in Research and Practice**. The 4<sup>th</sup> Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. PKS 2004. Proceedings. Edited by Prof. Dr. Reimund Neugebauer. Chemnitz, Alemanha, 2004, p487-502.
19. GROSSMANN, K. et al. Progress in Accuracy and Calibration of Parallel Kinematics. In: **Parallel Kinematic Machines in Research and Practice**. The 4<sup>th</sup> Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. PKS 2004. Proceedings. Edited by Prof. Dr. Reimund Neugebauer. Chemnitz, Alemanha, 2004, p49-68.
20. DENKENNA, B. et al. Universal Method for calibration of parallel and hybrid kinematics. In: **Parallel Kinematic Machines in Research and Practice**. The 4<sup>th</sup> Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. PKS 2004. Proceedings. Edited by Prof. Dr. Reimund Neugebauer. Chemnitz, Alemanha, 2004, p71-87.
21. LIJIN, F. et al. Error Modeling and Analysis on a Parallel Kinematic Machine. In: **Parallel Kinematic Machines in Research and Practice**. The 4<sup>th</sup> Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. PKS 2004. Proceedings. Edited by Prof. Dr. Reimund Neugebauer. Chemnitz, Alemanha, 2004, p107-121.
22. BLEICHER, F. et al. Automatically Operating Calibration Method for a three-axis Parallel Kinematics Machine. In: **Parallel Kinematic Machines in Research and Practice**. The 4<sup>th</sup> Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. PKS 2004. Proceedings. Edited by Prof. Dr. Reimund Neugebauer. Chemnitz, Alemanha, 2004, p165-181.

# CURRENT DEVELOPMENTS AND FUTURE TRENDS IN PARALLEL KINEMATIC MACHINES

**Tarcisio Antonio Hess Coelho**

Departamento de Engenharia Mecatrônica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, São Paulo, SP, CEP 05508-900, tarchess@usp.br

**Guilherme Raszl**

Centro Universitário da FEI , UniFEI, Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros. Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972 – bairro Assunção , CEP 09850-901 – São Bernardo do Campo, SP - C.P. 596, graszl@fei.edu.br

***Abstract.** During last decade, both academic and industrial communities have spent a great effort towards developing machine tools and robot manipulators based on a new promising architecture called Parallel Kinematic Machine (PKM). In this novel kinematic structure, a moving platform – that supports a milling tool or a gripper - is connected to a fixed base by at least two independent limbs or legs. The main potential advantages of parallel kinematic machines, when compared to their serial counterparts, are higher load capacity, rigidity, and faster dynamic response. After many years of fundamental research, application-ready parallel kinematic machines are now on the market. This article describes main characteristic features of some PKM and other prototypes still in development stage. The paper also deals with some important issues related to the development of such machines and enumerates possible future trends.*

***Keywords:** machine tools, parallel kinematics*