

Apostila de Mecanismos para a Escola Avançada de Engenharia Mecatronica

Autor: Juliana Martins de Oliveira
Autor: Tarcísio Antonio Hess Coelho
Autor: André Ganier Coutinho

EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
PET MECATRONICA – Programa de Educação Tutorial

Resumo – O objetivo deste artigo é apresentar uma apostila de Mecanismos para alunos que ainda não iniciaram o curso de Engenharia. Os conceitos básicos de mecanismos como por exemplo grau de liberdade, vínculos, classificação, nomenclaturas e cálculo da mobilidade são abordados de forma compreensível ao aluno que não tenha conhecimentos prévios. Ao final, são propostos exercícios para a fixação do conteúdo.

Palavras-chaves: mecanismos, ensino

1 Introdução

Uma das tendências atuais é de que todos os países formem um único mercado internacional, reduzindo suas fronteiras e barreiras alfandegárias, levando a uma competição acirrada em todos os níveis da sociedade. Sendo assim, para que se atenda aos pedidos de clientes cada vez mais exigentes, surge a necessidade da fabricação de produtos altamente competitivos, que possuam alta qualidade, baixo custo e curto prazo de entrega. Isso implicará no desenvolvimento de máquinas de alto desempenho, flexíveis quanto ao tipo de produto fabricado e tamanho do lote, consumidoras de pouca energia e de baixo custo de manutenção. Diante desse quadro, os mecanismos, encarados como dispositivos mecânicos ou mesmo subsistemas de equipamentos maiores, se constituem em recursos energéticos para o domínio da tecnologia associada ao desenvolvimento dessas máquinas.

Segundo Reuleaux [1], mecanismo é uma combinação de corpos rígidos ou resistentes de tal forma conectados que se movam um em relação ao outro com movimento relativo definido.

Quanto a sua função, mecanismo é um sistema mecânico transformador de movimento [2]. É responsável pela transformação de um ou mais movimentos e entrada disponíveis em um ou mais movimentos de saída desejados (fig.1.1). No caso de um motor de combustão interna (fig.1.2), o movimento de translação alternativa do pistão é transformado em um movimento de rotação contínua do eixo das manivelas (virabrequim). Por outro lado, em um limpador de para-brisa (fig.1.3), o movimento de rotação contínua da manivela é convertido em um movimento de oscilação angular da palheta.

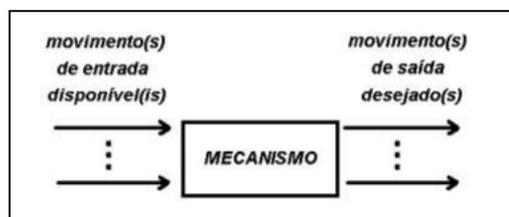


Fig 1.1 – Mecanismo: sistema mecânico transformador de movimento.

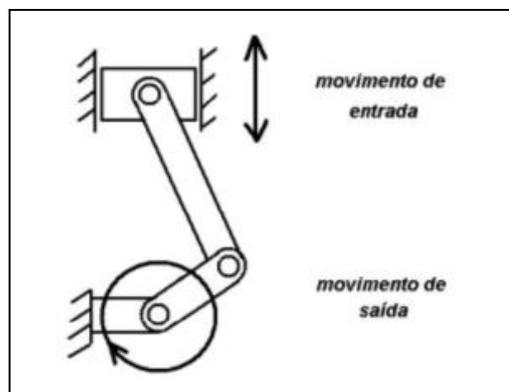


Fig 1.2 – Transformação de movimento em um motor de combustão interna.

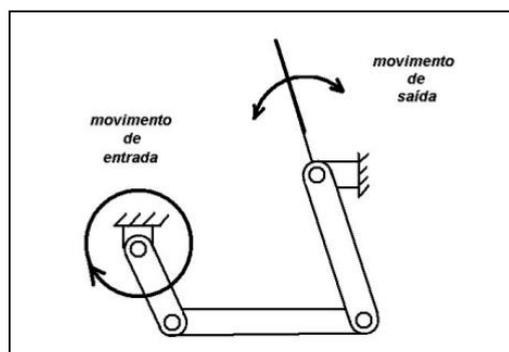


Fig 1.3 – Transformação de movimento em um limpador de para-brisa.

Tradicionalmente, incluem-se no grupo de mecanismos [3] os formados por um conjunto de barras conectadas por diferentes tipos de juntas (fig 1.2 e 1.3), os engrenamentos de rodas dentadas (fig 1.4a) e aqueles que possuem camo e seguidor (fig 1.4b).

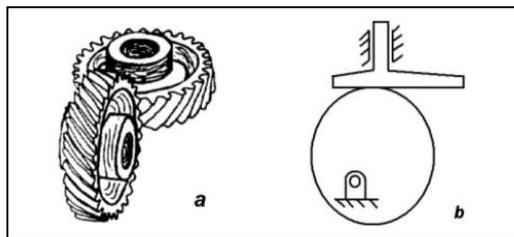


Fig 1.4 – (a) Engrenamento de rodas dentadas; (b) camo-seguidor

2 Topologia

2.1 Partes de um mecanismo

Conceitualmente, os mecanismos são formados apenas por suas peças, sejam elas móveis ou imóveis (fixas). O modo como estas peças se conectam depende somente da forma de suas extremidades. Podemos imaginar, por exemplo, uma peça na qual uma de suas extremidades possua a forma de um pino cilíndrico (fig. 2.1) e que esta peça, por sua vez, esteja conectada a outra cuja extremidade contenha um furo de diâmetro igual ao do pino da primeira peça. Desta maneira, os movimentos possíveis da segunda peça em relação a primeira serão uma rotação em torno do eixo do pino e uma translação ao longo do referido eixo. Como esta conexão define um vínculo entre duas peças, Releaux [1] a denominou de par cinemático e, no caso do exemplo, o par cinemático é chamado de cilíndrico.

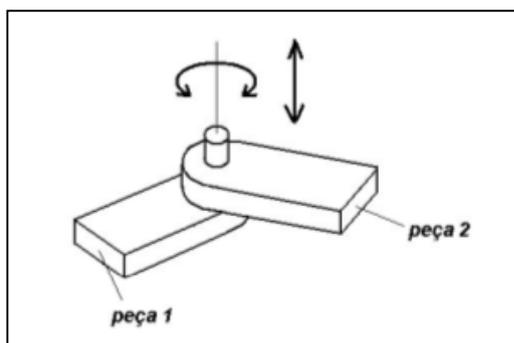


Fig. 2.1 – Exemplo de conexão entre duas peças.

No entanto, de modo a auxiliar a análise da topologia de um mecanismo e, também por questões construtivas, normalmente considera-se que um mecanismo seja composto por peças e pares cinemáticos (juntas). Na tabela 2.1, apresentam-se alguns tipos de pares cinemáticos comumente empregados na estrutura dos mecanismos.

Tabela 2.1 - Tipo de pares cinemáticos [3]

Nome do par cinemático	Forma geométrica	Representações esquemáticas	Graus de liberdade
1. Revolução (R)			1
2. Cilíndrico (C)			2
3. Prismático (P)			1
4. Esférico (S)			3
5. Universal (U)			2
6. Helicoidal (H)			1
7. Plano (P ₁)			3

Quanto à maneira com que o contato entre as peças é mantido, os pares cinemáticos podem ser fechados ou abertos. Nos pares fechados, a forma das peças impede a sua separação. Os pares abertos, no entanto, necessitam de uma força externa para a manutenção do contato. Quanto a natureza das regiões de contato entre as peças, os pares podem ainda ser inferiores ou superiores. Nos pares inferiores, o contato se dá sobre superfícies, enquanto que nos superiores, o contato se dá sobre um ponto ou linha. Como exemplo de pares fechados e inferiores podem ser mencionados, as juntas de revolução (rotação), esféricas e prismáticas. Como exemplos de pares abertos superiores, pode-se citar o camo de disco e seguidor de sapata.

Ainda sob o ponto de vista teórico, existe uma tênue distinção entre mecanismos e as chamadas cadeias cinemáticas. As cadeias cinemáticas estão mais associadas a porções ou subsistemas de um mecanismo, além do fato de não incluírem a peça fixa, imóvel. As cadeias cinemáticas, por sua vez, admitem uma pequena classificação (fig. 2.2). Uma cadeia é dita *fechada* se as suas duas extremidades encontram-se unidas. Quando as duas extremidades da cadeia são separadas, a cadeia é denominada *aberta*. Duas cadeias são *dependentes* quando o movimento de uma cadeia é determinado pelo da outra. Por outro lado, consideram-se duas cadeias como *independentes*, no caso em que o movimento de uma cadeia não afeta o movimento de todas as peças que pertencem à outra.

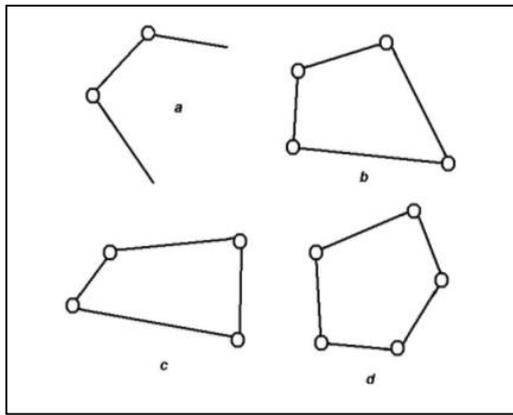


Fig. 2.2 – Cadeias cinemáticas: (a) aberta, (b) fechada, (c) dependentes, (d) independentes

Da maneira que se utilizam esquemas simplificados para representar circuitos elétricos, hidráulicos e pneumáticos, também costumam ser adotados para representar mecanismos os chamados diagramas cinemáticos. A fig. 2.3 apresenta o diagrama cinemático do mecanismo de um motor de combustão interna monocilíndrico. Como se podem observar, em muitas situações, as peças são representadas apenas por segmentos de reta. Para os pares cinemáticos, contudo, não existe na literatura um consenso quanto ao par cinemático e sua respectiva forma de representação. Assim, foram também incluídas na tabela 2.1 formas alternativas para estas representações.

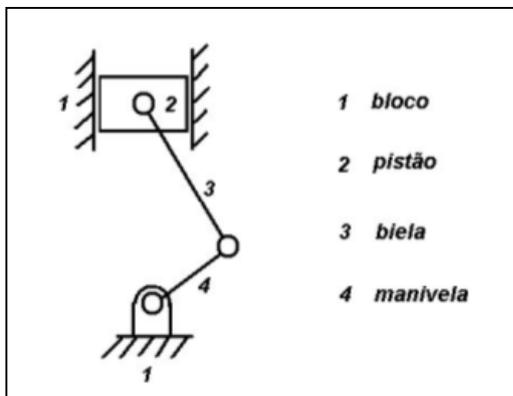


Fig. 2.3 – Diagrama cinemático de um motor de combustão interna monocilíndrico.

2.2 Critérios de Classificação e nomenclatura

Quanto aos espaços em que as peças móveis executam seus movimentos, os mecanismos podem ser planos ou tridimensionais. Nos mecanismos planos, as peças executam movimentos em planos que sejam paralelos entre si. Os mecanismos tridimensionais, por sua vez, são representados por aqueles que não satisfazem a categoria de mecanismo plano. Dentre os mecanismos tridimensionais, existe ainda uma categoria formada pelos mecanismos esféricos, em que os pontos de suas peças desenvolvem trajetórias sobre esferas concêntricas.

Quanto aos tipos de cadeias cinemáticas presentes em

um dado mecanismo, eles podem ser classificados como compostos por cadeias abertas e fechadas. Uma outra denominação mais recente para mecanismos de cadeia aberta é chama-los de seriais. Uma outra categoria dentro dos mecanismos de cadeia fechada são os mecanismos ditos paralelos. Os mecanismos paralelos possuem pelo menos duas cadeias ativas independentes, conectando a sua base (peça fixa) ao órgão terminal (peça que realiza o movimento de saída). No caso da estrutura cinemática conter cadeias abertas e fechadas, os mecanismos são denominados híbridos.

A nomenclatura normalmente empregada para denominar um determinado mecanismo considera a sequência em que os pares cinemáticos aparecem na sua estrutura (EX.: RRRR, PRRR, RSSR, 3 RRR, 6 UPS).

2.3 Graus de liberdade

Neste texto, considera-se que o grau de liberdade seja uma propriedade associada a um determinado par cinemático. Esta propriedade refere-se ao número de movimentos independentes possíveis que uma das peças do par pode executar em relação à outra.

2.4 Mobilidade

Neste texto, considera-se que a mobilidade seja uma propriedade associada a um determinado mecanismo. Esta propriedade refere-se ao número de movimentos independentes possíveis que as peças móveis do mecanismo podem executar. Na maioria dos casos, coincide com o número de motores necessários para a movimentação do mecanismo. Para determinação da mobilidade de um mecanismo, emprega-se o critério de Gruebler

$$M = 3 * (n - 1) - 2 * n_{p1} - n_{p2} \quad (2.1)$$

onde M é a mobilidade, n é o número de peças incluindo a peça imóvel, n_{p1} é o número de pares cinemáticos que permitem apenas um grau de liberdade n_{p2} é o número de pares cinemáticos que permitem até dois graus de liberdade. O critério expresso pela eq.(2.1) é válido apenas para mecanismos planos, ou seja, que se movimentam dentro de espaço bidimensional.

Exemplo 2.1: biela-manivela. Este mecanismo, formado por quatro peças ($n=4$), possui quatro pares cinemáticos do tipo $P1$, um prismático ($I2$) e três de revolução ($23, 34, 41$). Assim, n_{p1} vale 4 e n_{p2} , zero, porque este mecanismo não contém pares do tipo $P2$. Utilizando o critério de Gruebler, determina-se que a sua mobilidade é unitária.

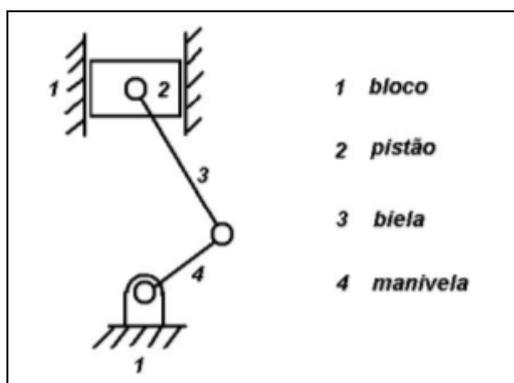


Fig. 2.4 – Biela-manivela ou PRRR.

Exemplo 2.2: camo de disco de sapata plana. Este mecanismo é formado apenas por três peças e três pares cinemáticos. Dois destes pares são do tipo *PI*: *I2* de revolução e *I3* prismático. O par *23* é superior e permite um movimento de roto-translação da peça 3 em relação à peça 2 sendo, portanto, do tipo *P2*. Aplicando-se o critério de Gruebler, obtém-se também para este mecanismo a mobilidade unitária.

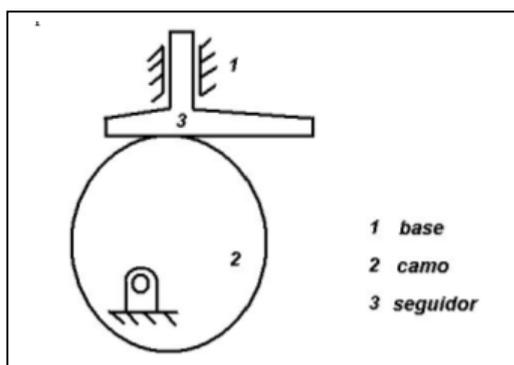


Fig. 2.5 – Camo de disco e seguidor de sapata plana.

Para determinar-se a mobilidade de mecanismos tridimensionais, emprega-se o critério de Kutzbach-Gruebler

$$M = 6 * (n - 1) - 5 * n_{p1} - 4 * n_{p2} - 3 * n_{p3} - 2n_{p4} - n_{p5} \quad (2.2)$$

onde M é a mobilidade, n é o número de peças incluindo a peça imóvel, n_{pj} ($j=1, \dots, 5$) é o número de pares cinemáticos que permitem j grau de liberdade.

Exemplo 2.3: Observe a suspensão veicular da fig. 2.6^a. Considerando somente um de seus lados, tal mecanismo é formado por quatro peças e quatro pares cinemáticos. As 4 peças são o chassi (1), as bandejas superior (2) e inferior (4) e o pino-mestre (3). o chassi é a peça fixa, ou imóvel. Quanto aos pares cinemáticos, há 2 pares de revolução *I2* e *I4* ($n_{p1}=2$) e dois pares esféricos *23* e *34* ($n_{p3} = 2$) e, desta forma, a mobilidade deste mecanismo assumirá o valor 2. Esta

mobilidade corresponde aos movimentos de subida e descida da roda, e do seu próprio giro de modo a receber a atuação do mecanismo da direção (não indicado na figura).

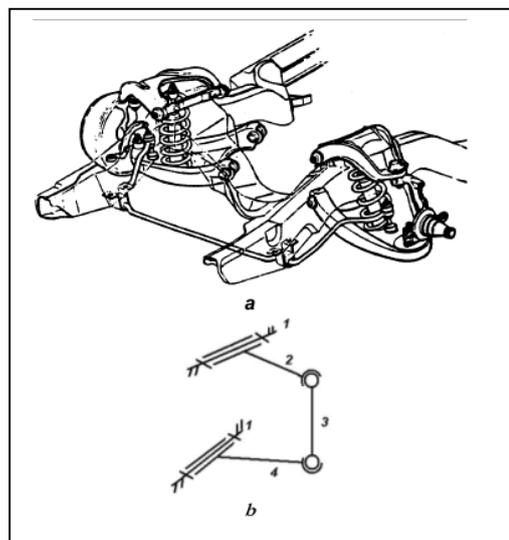


Fig. 2.6 – (a) suspensão veicular; (b) diagrama cinemático correspondente.

2.5 Métodos de geração de arquiteturas

Além do critério de Kutzbach-Gruebler, existem procedimentos mais sistemáticos para a geração de mecanismos paralelos. Um destes procedimentos é chamado de *método da enumeração das cadeias ativas* [4]. Inicialmente, o método admite que o número de cadeias ativas – aquelas cadeias abertas que ligam a base ao órgão terminal – coincida com a mobilidade desejada para o mecanismo. Além disso, a *conectividade total* C_t [5], definida como a soma dos graus de liberdade de todas as cadeias presentes, deve ser determinada pela eq. (2.3). O valor λ correspondente ao número de movimentos independentes do mecanismo. Uma vez obtida a conectividade total, é possível enumerar um número expressivo de estruturas cinemáticas que satisfaçam estas condições.

$$(\lambda + 1) * M - \lambda = C_T \quad (2.3)$$

Exemplo 2.3: Suponha que se pretenda gerar possíveis mecanismos paralelos que sejam capazes de posicionar e orientar o órgão terminal dentro de um espaço bidimensional. Assim, Tal mecanismo deverá ter mobilidade 3, ou seja, permitir que o órgão terminal execute duas translações, horizontal e vertical, além do movimento de rotação. Como as possíveis arquiteturas corresponderão a mecanismos planos, λ deve ser igual a 3. Substituindo-se estes valores na eq. (2.3), obtém-se o valor 9 para a conectividade total. Admitindo-se ainda que o mecanismo será simétrico, cada uma das três cadeias ativas terá conectividade 3. Considerando que cada cadeia ativa possuirá, no máximo, 3 juntas e duas peças, uma arquitetura possível é o mecanismo 3 RRR (fig. 2.7). Como exemplos de outras arquiteturas alternativas a esta, podem ser citadas 3 PRR e 3 RPR.

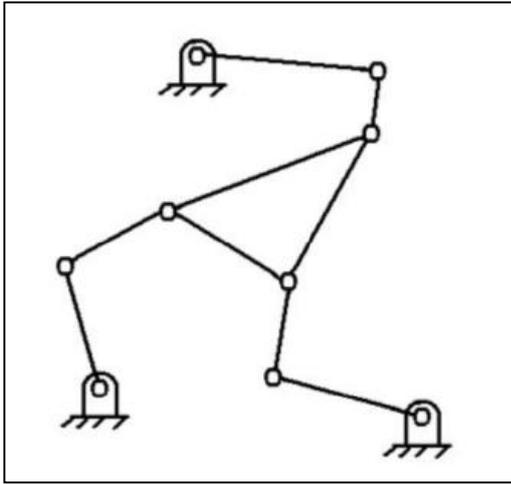


Fig. 2.7 – Mecanismo 3 RRR.

Um outro procedimento alternativo para geração de arquiteturas é denominado *método da adição de uma cadeia passiva* [6]. Tal método considera que o movimento do órgão forma, a cadeia passiva é cuidadosamente escolhida de tal maneira que a mobilidade M e os tipos de movimentos disponíveis para o órgão terminal realmente correspondam aqueles desejados (especificados). Além disso as conectividades parciais das cadeias ativas restantes devem ser iguais a λ .

Exemplo 2.4: Suponha que se pretenda determinar um mecanismo paralelo cujo órgão terminal deva ser orientado num espaço tridimensional, ou seja, deve executar três movimentos da rotação independentes. Para tanto, pode-se empregar uma cadeia passiva composta apenas por duas peças, uma solidária à base e a outra vinculada ao órgão terminal, além de uma junta esférica. Para que o órgão terminal adquira a orientação desejada, utilizam-se três cadeias ativas com conectividade igual a 6, cada uma. Portanto, uma estrutura cinemática possível é a 3 RUS + 1 S (fig. 2.8). Como exemplos de arquiteturas alternativas a esta, podem ser citadas 3 PUS + 1 S e UPS + 1 S.

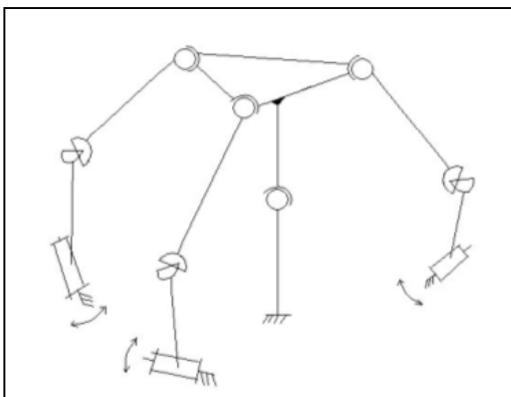


Fig. 2.8 – Mecanismo 3RUS+1S

2.6 Exercícios

Ex 2.1: Construa os diagramas cinemáticos dos mecanismos das fig 2.9 e fig 2.10.

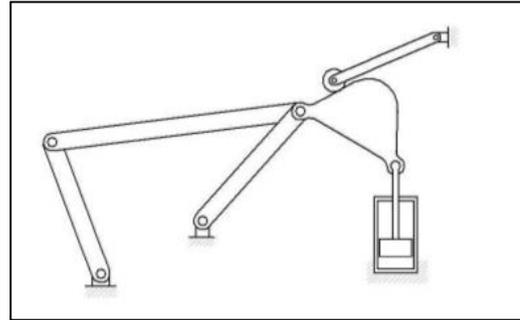


Fig 2.9

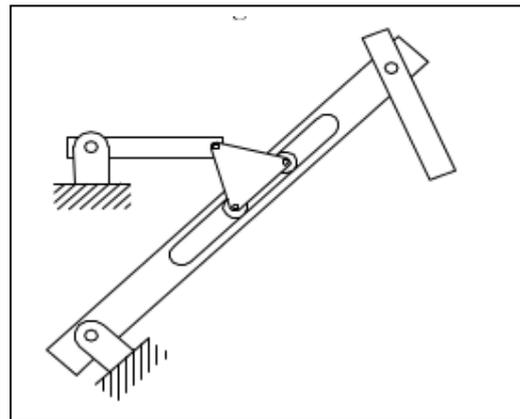


Fig 2.10

Ex 2.2: Para os mecanismos das figs 2.11 a 2.14 enumere e identifique suas peças. Classifique completamente seus pares cinemáticos. Determine sua mobilidade, e compare o resultado obtido com aquele correspondente à sua intuição.

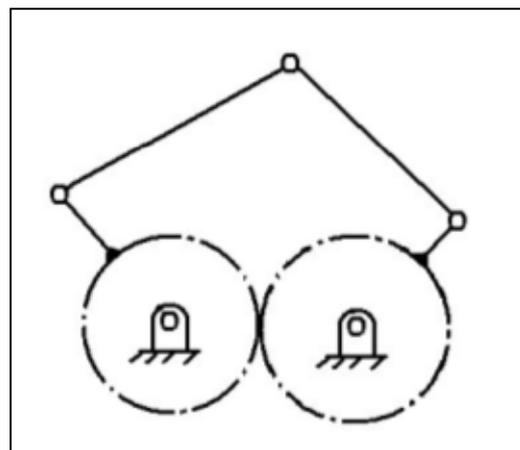


Fig 2.11

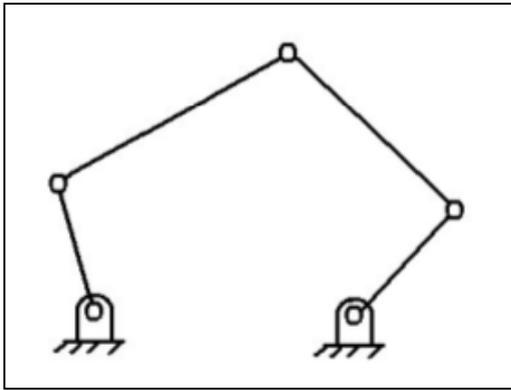


Fig 2.12

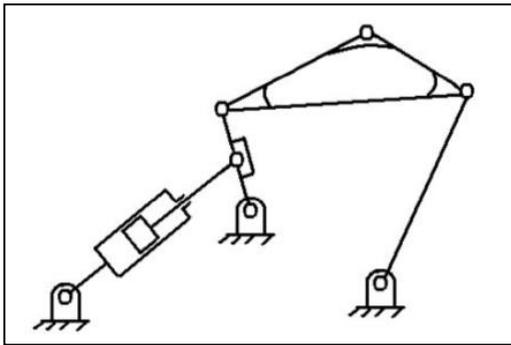


Fig 2.13

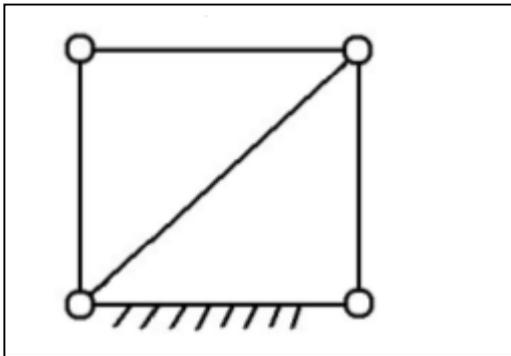


Fig 2.14

Ex 2.3: Determine a mobilidade do mecanismo da fig 2.15. Qual é o movimento possível da peça que contém a garra? Onde você instalaria os motores?

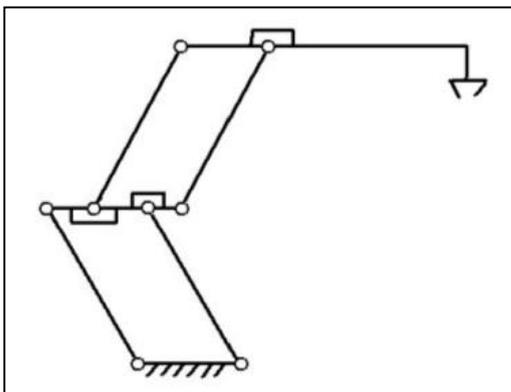


Fig. 2.15

Ex 2.4: Construa os diagramas cinemáticos dos mecanismos da fig 2.16, 2.17 e 2.18. Determine sua mobilidade, compare o resultado com aquele correspondente à sua intuição.



Fig 2.16



Fig 2.17

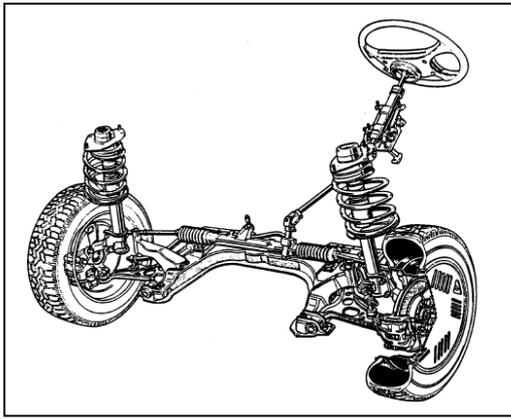


Fig 2.18

Ex 2.5: Admita que se pretenda projetar um mecanismo paralelo cujo órgão terminal execute, num espaço tridimensional, três movimentos independentes, dois de rotação e um de translação. Proponha duas arquiteturas possíveis para tal função, uma através do método de enumeração de cadeias ativas e a outra pelo método da adição de uma cadeia passiva.

3 Referências

[1] Reuleaux, F. *Theoretische Kinematik*, Friedrich Vieweg und Sohn, Brunswick, Germany, 1875.

Translation by A. B. W. Kennedy, “Reuleaux, *Kinematics of Machinery*”, Macmillan, London, 1876. Reprinted by Dover Publications, New York, 1963.

[2] Hartenberg, R.S & Denavit, J. *Kinematic Synthesis of Linkages*, Mc Graw Hill Co., New York, 1964.

[3] Such, C.H.; Radcliffe, C. W. *Kinematics and Mechanism Design*, John Wiley & Sons, New York, 1978.

[4] Hunt, K. H., *Structural kinematics of in-parallel-actuated robot arms*. *Journal of Mechanisms, Transmission and Automation in Design*. Transactions of the ASME, vol. 105, 1983, pp 705-712.

[5] Shoham, M & Roth, B, *Connectivity in open and closed loop robotic mechanisms*. *Mechanism and Machine Theory*. Vol. 32, No. 3, 1997, pp279-293.

[6] Brogardh, T. , *PKM Research – Important Issues, as seem from a Product Development Perspective at ABB Robotics*. In Proceedings of the WORKSHOP on *Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators* October 3-4, 2002, Quebec City, Quebec, Canada, 2002, pp 68-82.