ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PMR 3405 – Mecanismos para automação

Prof. Dr. Tarcisio A. H. Coelho

2017

Topologia de Máquinas e seus subsistemas. Transmissões mecânicas

- Introdução
- Aplicações industriais
- Topologia e mobilidade
- Métodos para síntese de mecanismos
- Pesquisa: suspensão veicular
- Conclusão

Introdução

- Cenário atual

a) robôs industriais

Introdução

- Cenário atual

b) Robô doméstico

Tarefas em ambiente não-estruturado

Salisbury, K.
Stanford University,
Agosto, 2007

Introdução

- Cenário atual

c) Robô humanóide (Honda Asimo)

Veloc.: 3,0 km/h (correndo)
2,5 km/h (andando)
Altura: 130 cm
Massa: 54 kg
Tempo de operação contínua: 1h
Graus de Liberdade: 34

Introdução

- ABB 340 Flexpicker

Veloc. Máx. = 10 m/s

Aceler. Máx. = 60 m/s^2 (2 kg)
= 100 m/s^2 (1kg)

Capacidade Máx. = 2kg

Espaço de trabalho = 273 dm^3

Introdução

- Cenário atual

d) Veículo autônomo da Google

e) Drones

Aplicações industriais

corte com jato d'água

(Brogardh, 2002)

corte a laser

fresamento

furação

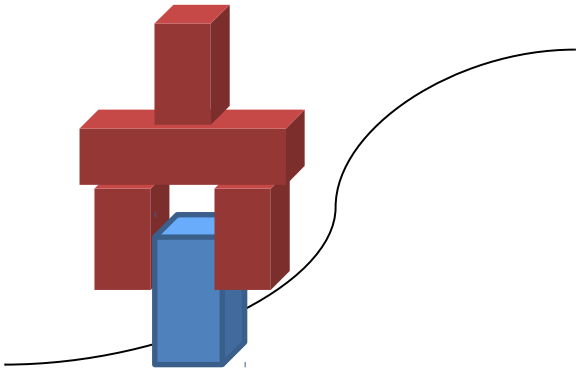
medição

rebarbação

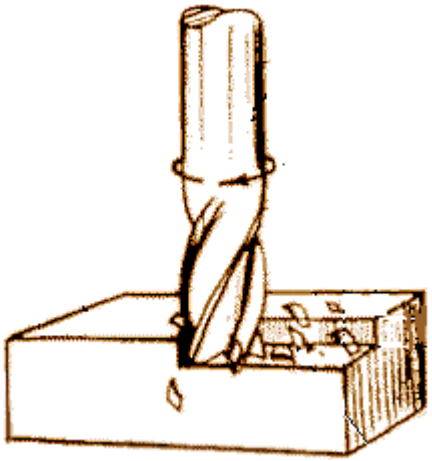
montagem

rebitagem

Aplicações industriais



Manipulação



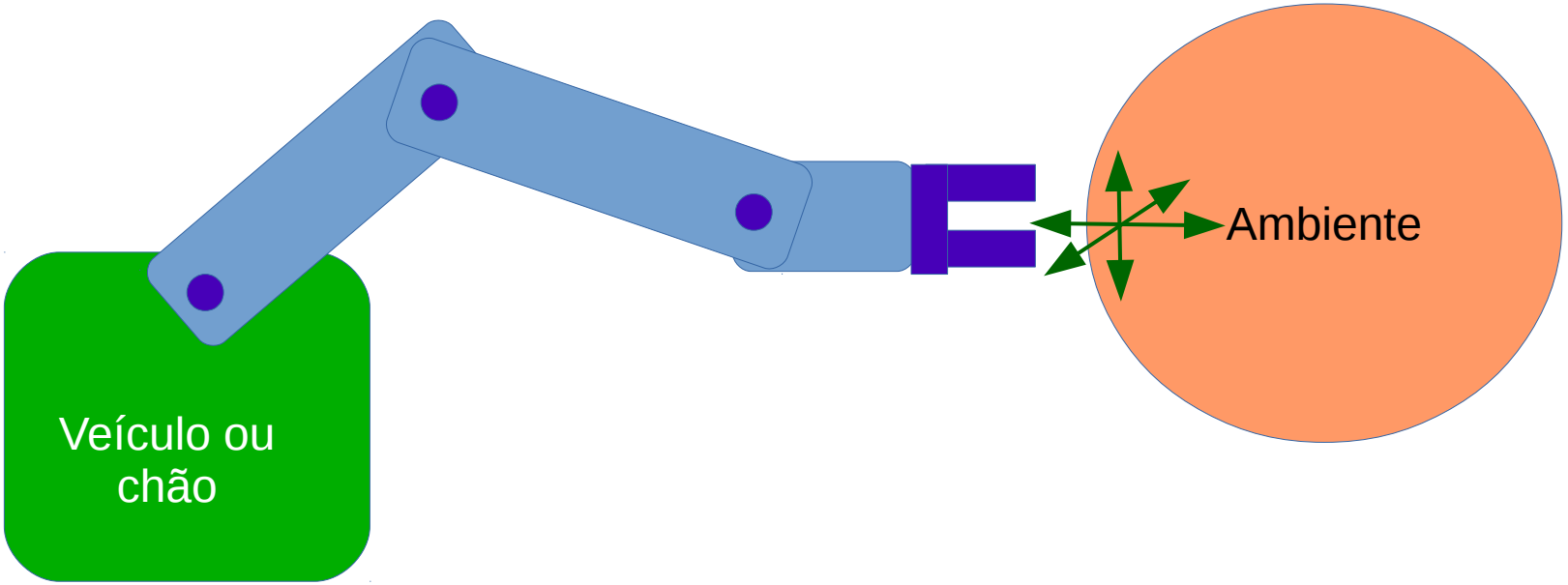
Usinagem

Aplicações industriais

	No. de eixos				
Operação	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Manipulação		■	■		
Montagem			■	■	■
Medição				■	■
Corte a laser	■	■		■	
Corte a jato d'água	■	■		■	
Rebitagem				■	
Furação		■		■	
Rebarbação					■
Fresamento		■		■	■

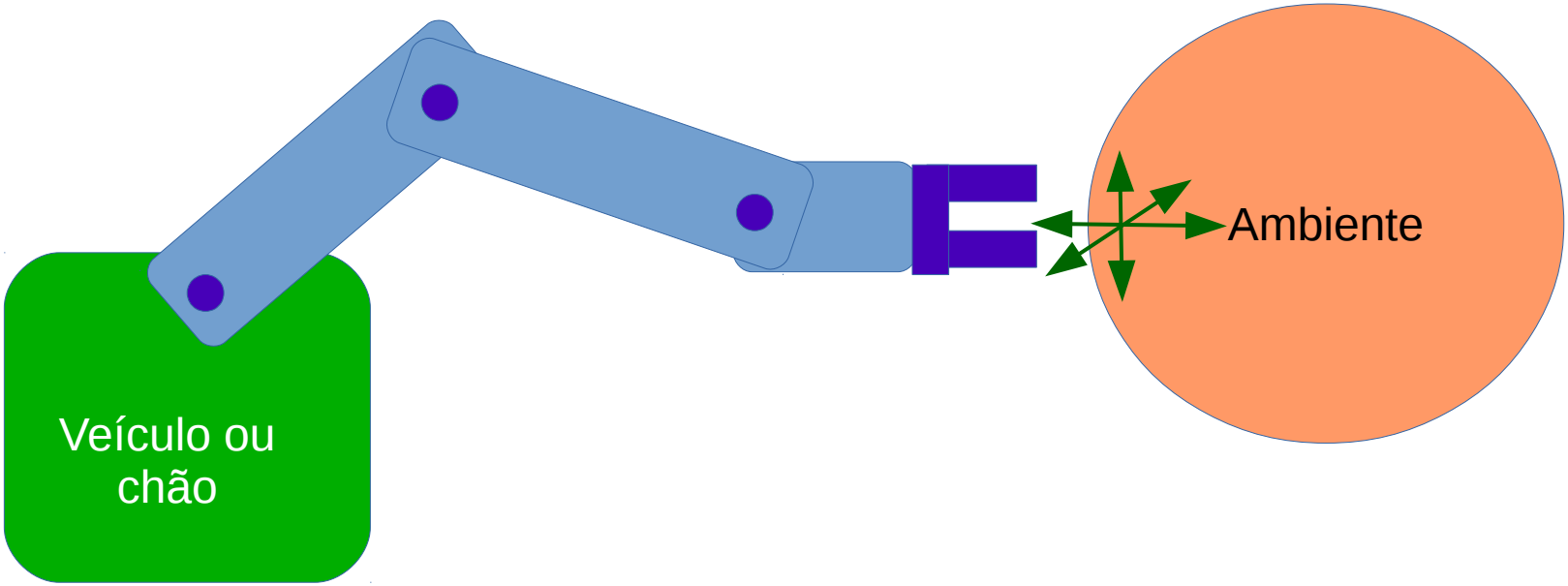
(Brogardh, 2002)

Como determinar a estrutura mecânica da máquina ou robô?



Capaz de realizar determinados deslocamentos lineares e/ou angulares

Como determinar a estrutura mecânica da máquina ou robô?



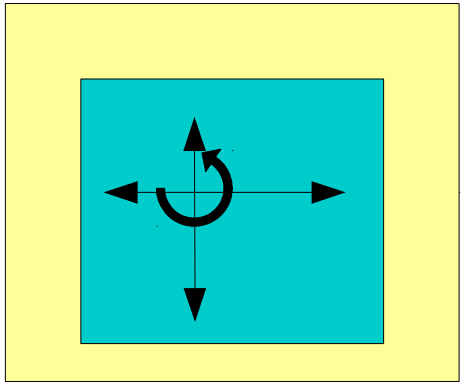
Quantos componentes e qual o número de motores necessários?

Espaços de movimentação

- Plano

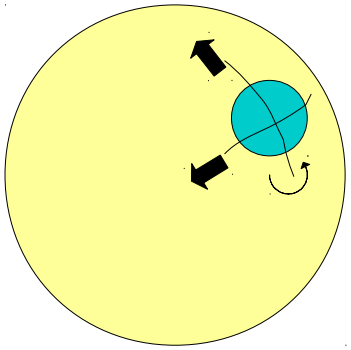
Espaços de movimentação

- Número máximo de deslocamentos independentes em cada espaço



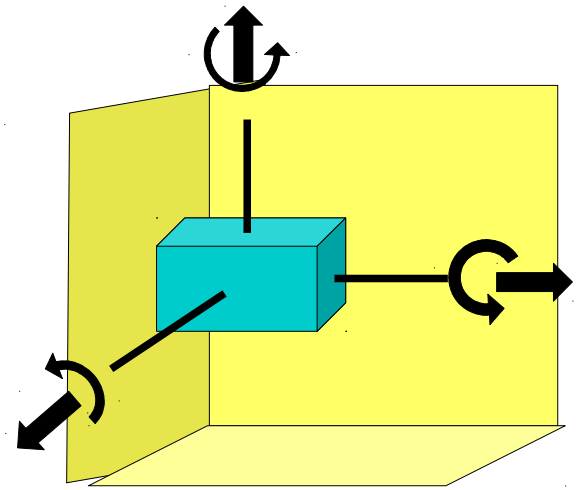
Espaços de movimentação

- Esférico



Espaços de movimentação

- Tridimensional

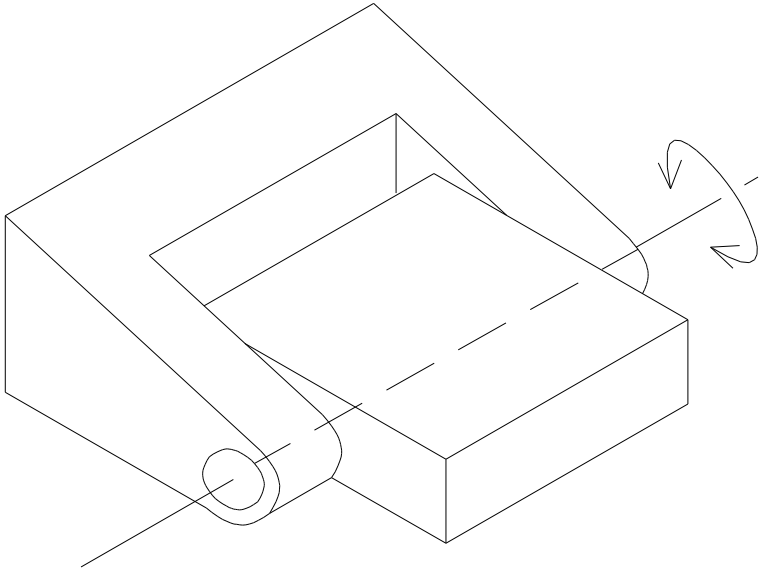


Espaços de movimentação

- Restrições aos deslocamentos

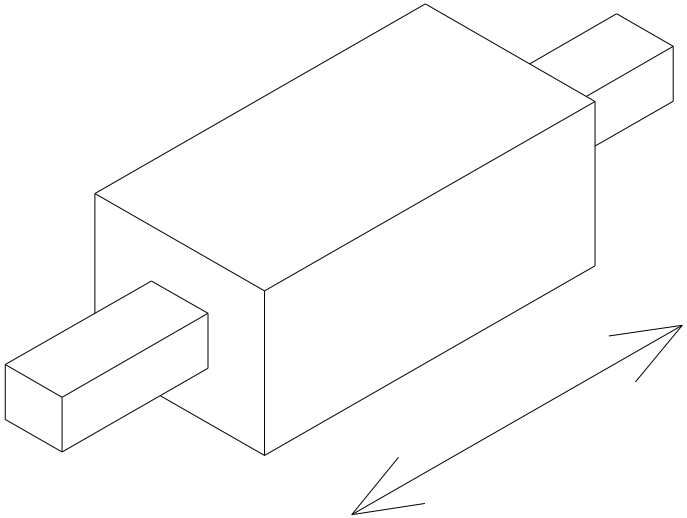
Propriedades fundamentais

ROTATIVO



Par de 1 GRAU DE LIBERDADE (G.D.L.)

Propriedades fundamentais



PRISMÁTICO

Par de 1 GRAU DE LIBERDADE (G.D.L.)

Topologia dos mecanismos

- Cadeia:

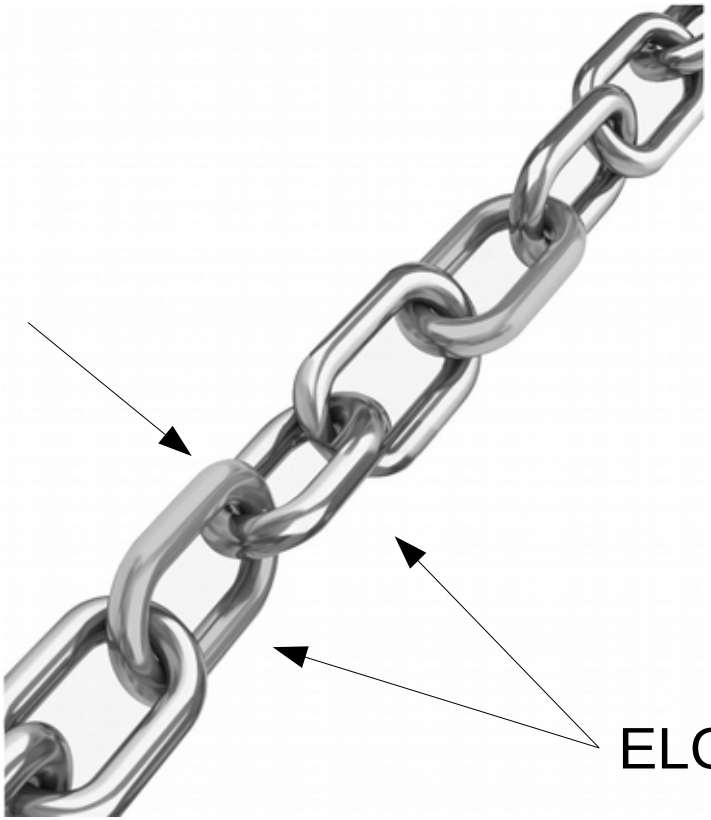
  sf (lat catena)

  1 Corrente formada de anéis ou elos quaisquer. 2 Grilheta para acorrentar presos; algema, grilhão. 3 Corrente de relógio de bolso. 4 Qualquer ligame. 5 Fila de pessoas disposta de modo que possam passar objetos de mão em mão. 6 Série ininterrupta de coisas semelhantes: Cadeia de montanhas. 7 Continuidade, encadeamento, sucessão. 8 Edifício público onde se prendem provisoriamente, até o julgamento, delinquentes e suspeitos; cárcere.

  (Fonte: Dicionário Online de Português Michaelis)

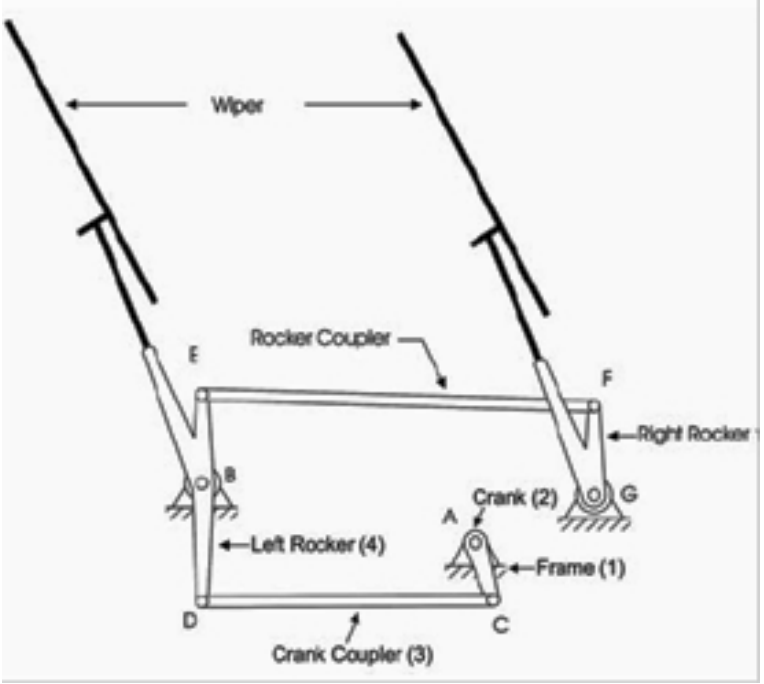
Topologia dos mecanismos

- Cadeia cinemática [Releaux, 1875]:



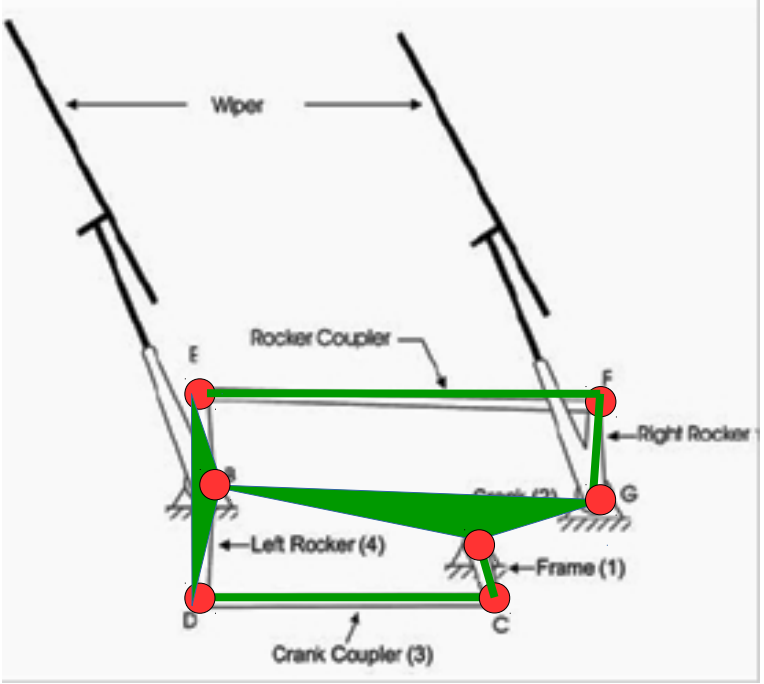
Topologia dos mecanismos

- Cadeia cinemática: elos e pares (juntas)



Topologia dos mecanismos

- Cadeia cinemática: elos e pares (juntas)

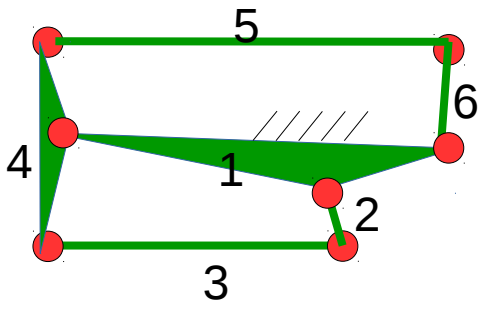


6 ELOS

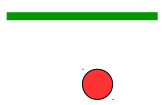
7 Pares (juntas)

Topologia dos mecanismos

- Cadeia cinemática: elos e pares (juntas)

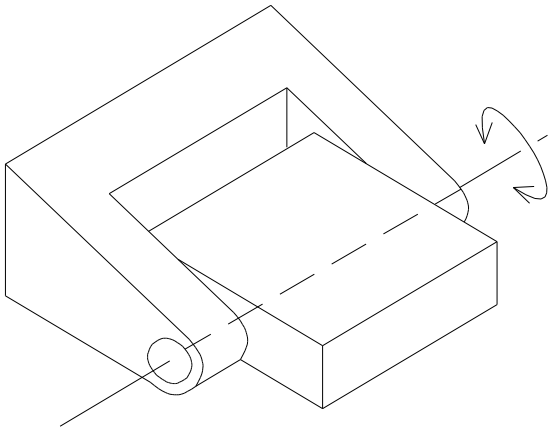


7 Pares (juntas de rotação):
12, 23, 34, 41,
45, 56, 61



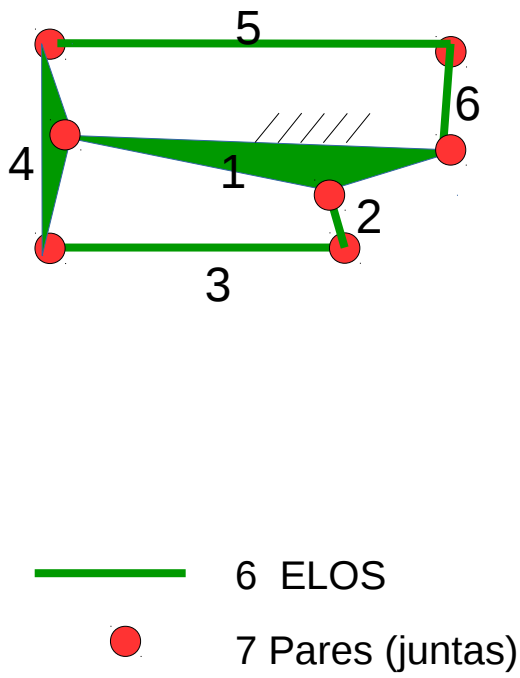
6 ELOS

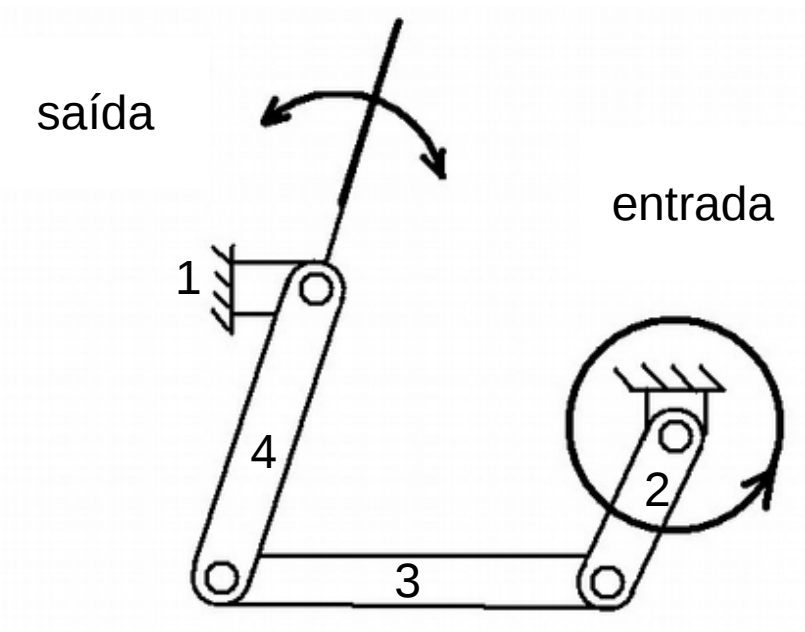
7 Pares (juntas)



Topologia dos mecanismos

- Cadeia cinemática: elos e pares (juntas)





Quadriláteros articulados:
1234 e 1456

Topologia dos mecanismos

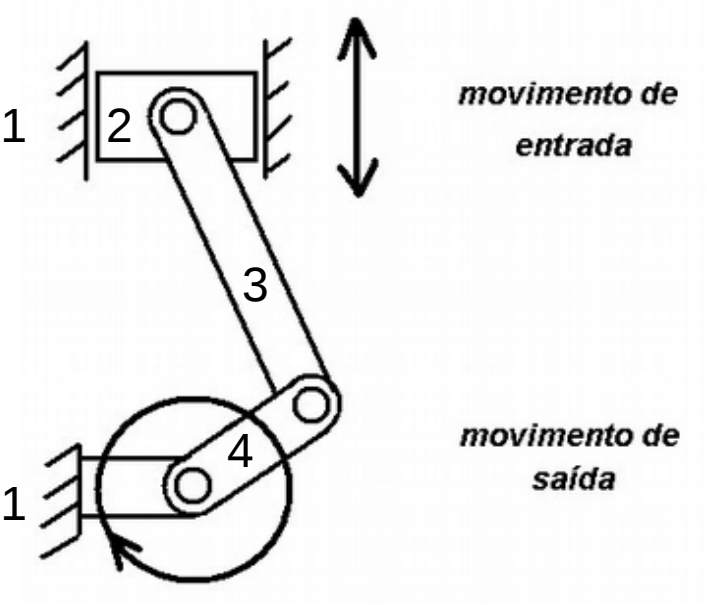
- Cadeia cinemática: elos e pares (juntas)

Topologia dos mecanismos

- Cadeia cinemática: elos e pares (juntas)

10 ELOS

13 Pares (juntas)

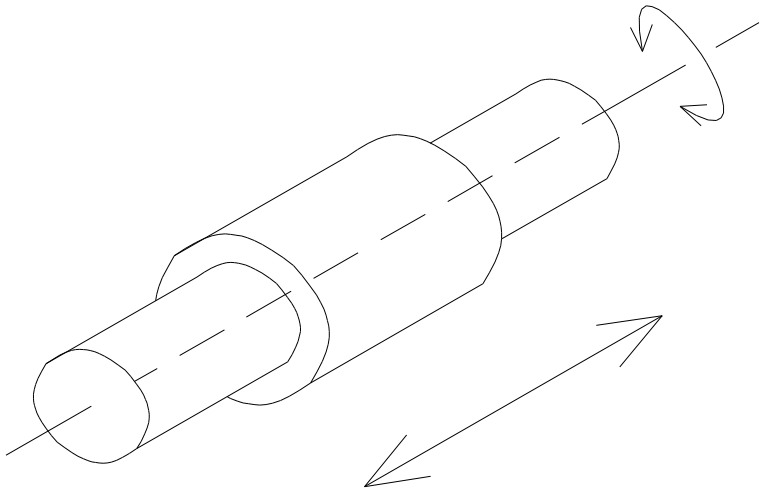


Biela-manivela: 1234

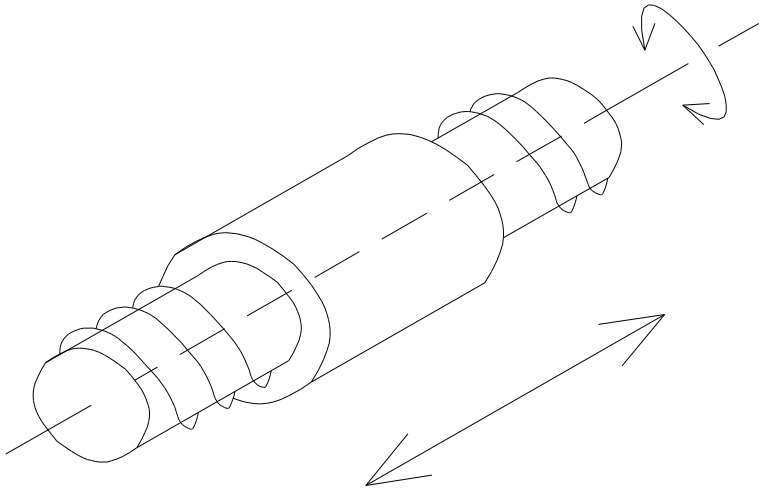
Propriedades fundamentais

- Graus de liberdade (do par)

CILÍNDRICO



Pares: 2 GDL



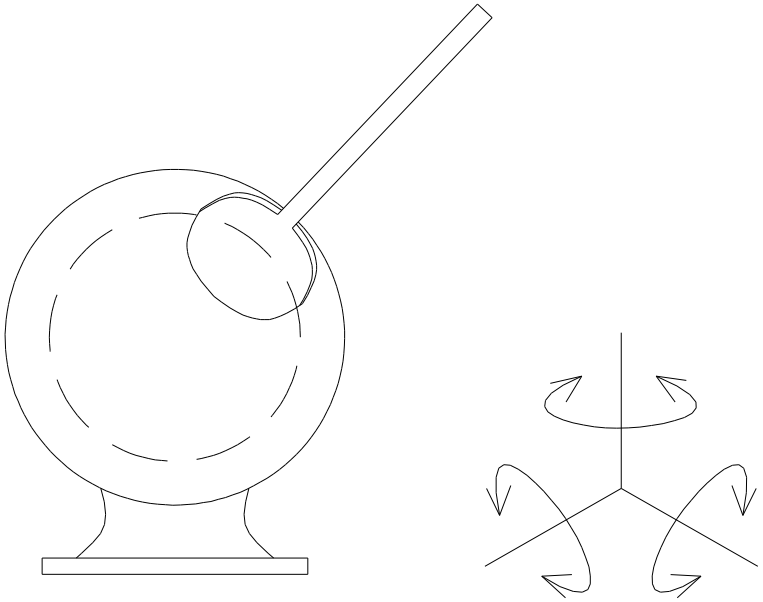
1GDL

HELICOIDAL

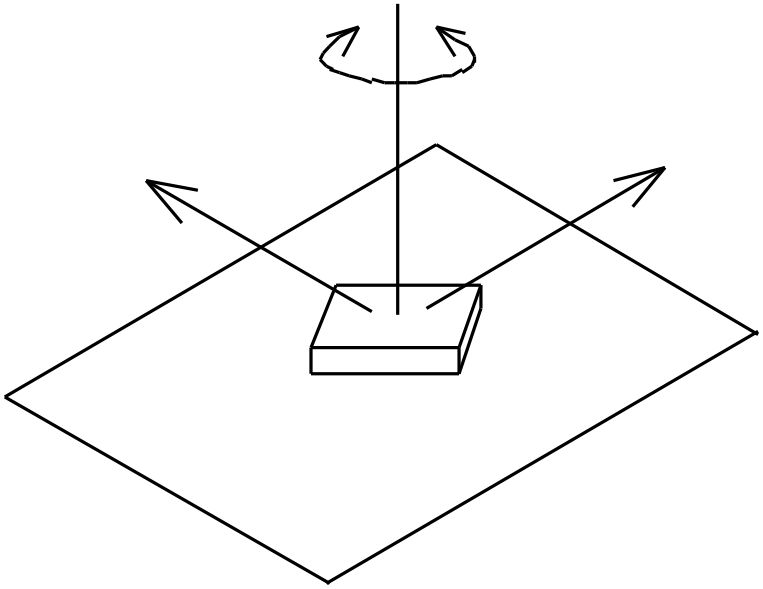
Propriedades fundamentais

- Graus de liberdade (do par)

ESFÉRICO



Pares: 3 GDL



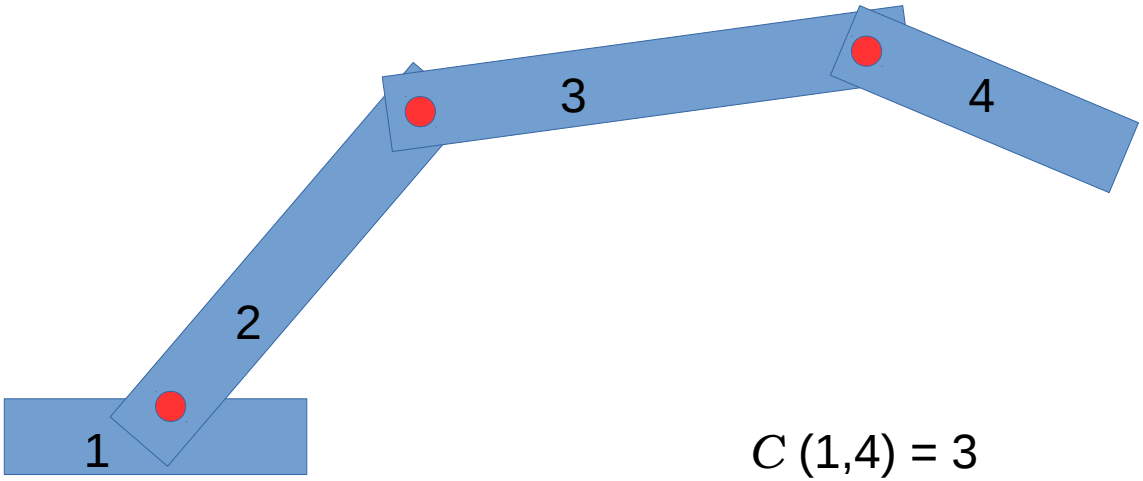
PLANO

3GDL

Propriedades fundamentais

- Conectividade (entre elos)

No. de coordenadas para descrever
a localização de um elo
em relação ao outro da cadeia

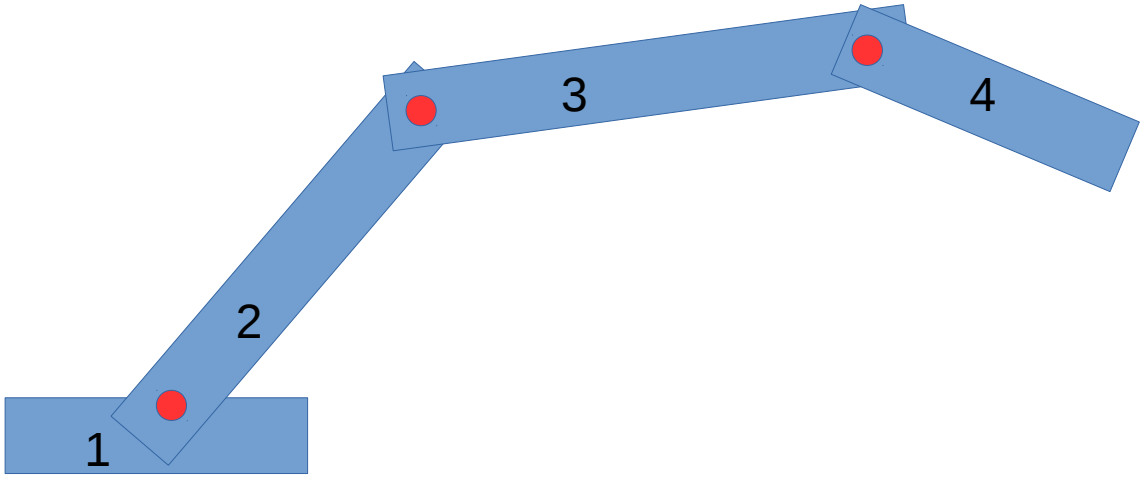


C (1,4) = 3
C (2,3) = 1
C (2,4) = 2

Propriedades fundamentais

- Conectividade da cadeia

Conectividade entre os elos extremos da cadeia



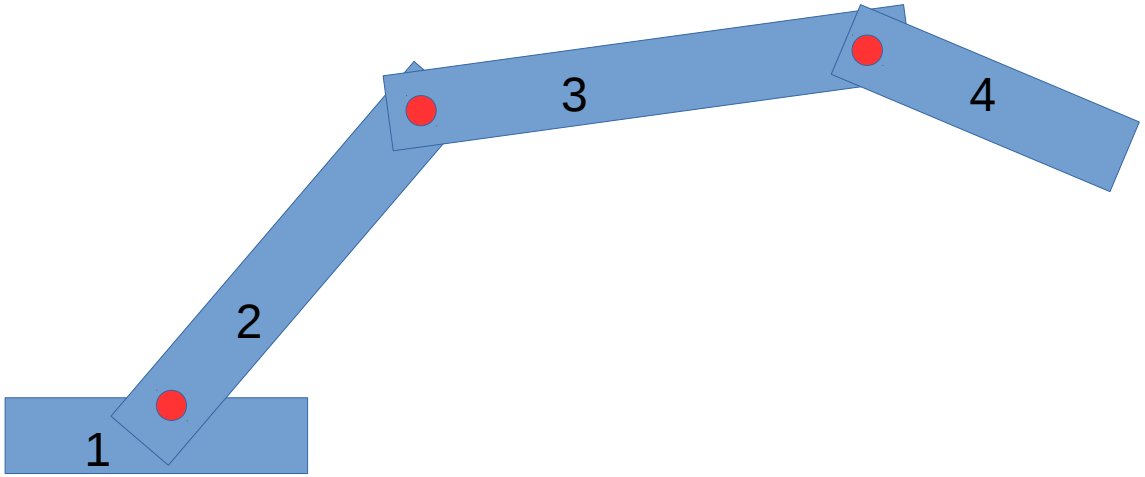
Cadeia 1234

$$C_{1234} = C(1,4) = 3$$

Propriedades fundamentais

- Conectividade da cadeia

Conectividade entre os elos extremos da cadeia



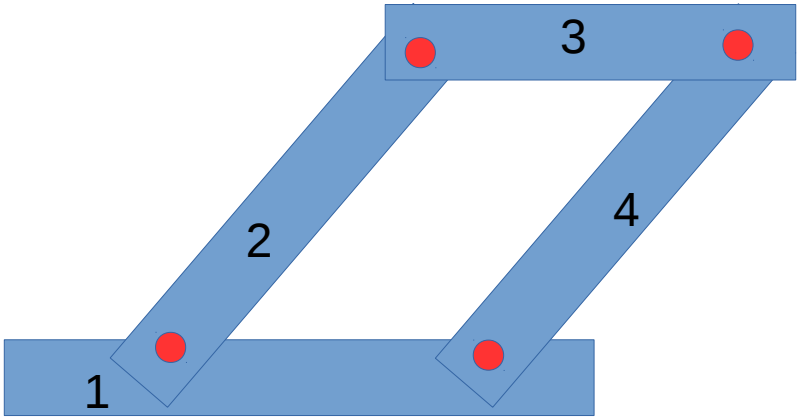
Cadeia 1234

$$C_{1234} = C(1,4) = 3$$

Propriedades fundamentais

- Conectividade (entre elos)

No. de coordenadas para descrever
a localização de um elo
em relação ao outro da cadeia



Paralelogramo articulado: 1234

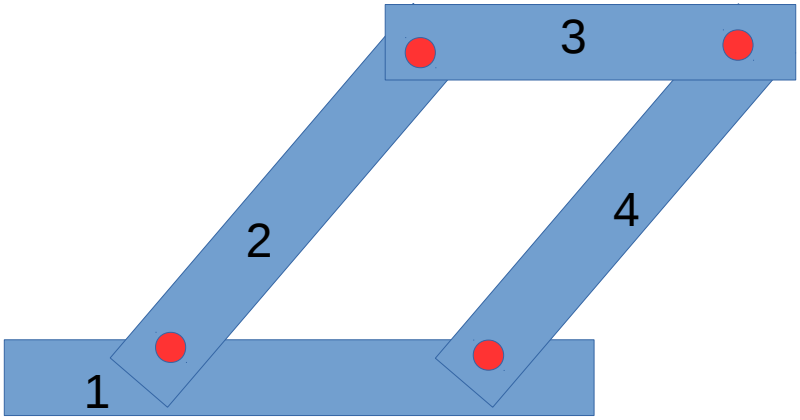
C (1,3) = 1

C (2,3) = 1

Propriedades fundamentais

- Conectividade (entre elos)

No. de coordenadas para descrever
a localização de um elo
em relação ao outro da cadeia



Paralelogramo articulado: 1234

C (1,3) = 1

C (2,3) = 1

Propriedades fundamentais

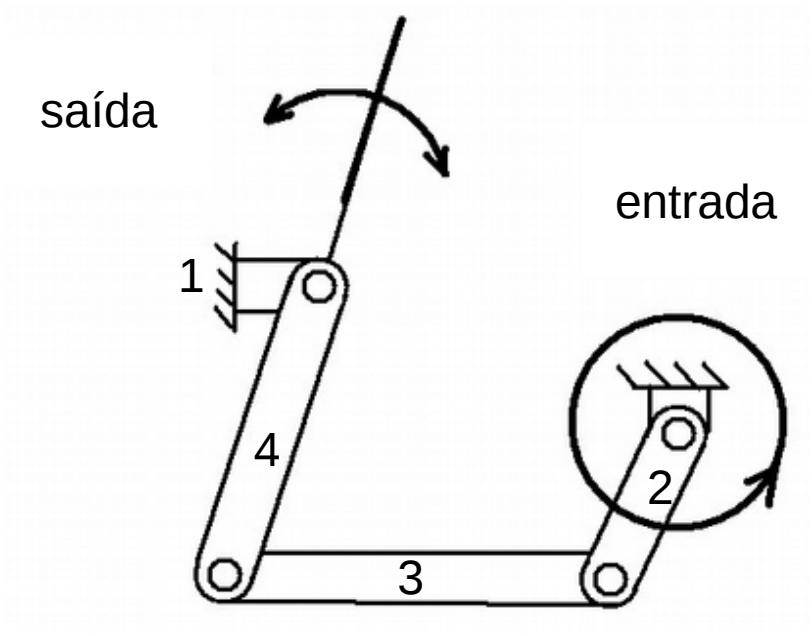
- Mobilidade (do mecanismo)

Índice que mede a capacidade de um mecanismo de proporcionar uma variedade de movimentos

Geralmente, coincide com o número de motores

Propriedades fundamentais

- Mobilidade (do mecanismo)

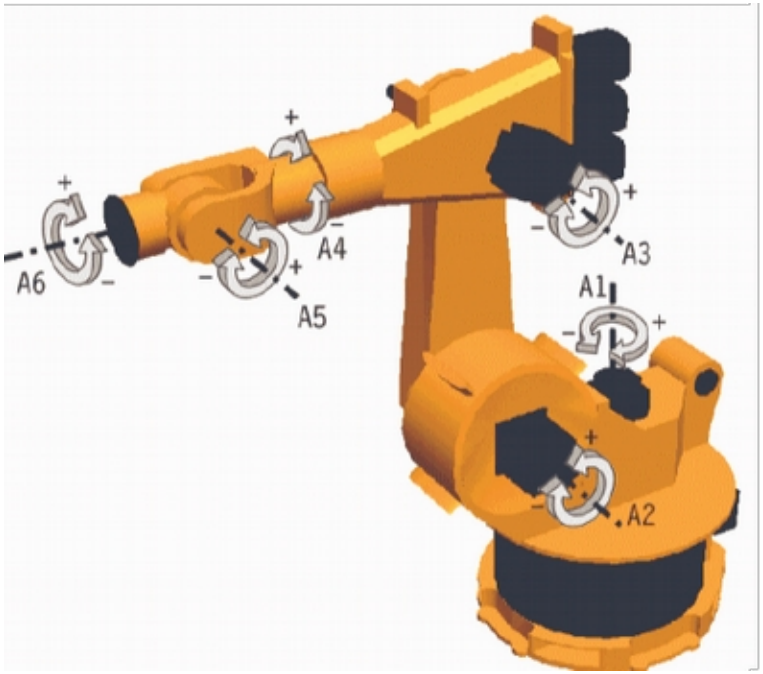


Quadrilátero articulado:
1234

M = 1

Propriedades fundamentais

- Mobilidade (do mecanismo)



M = 6

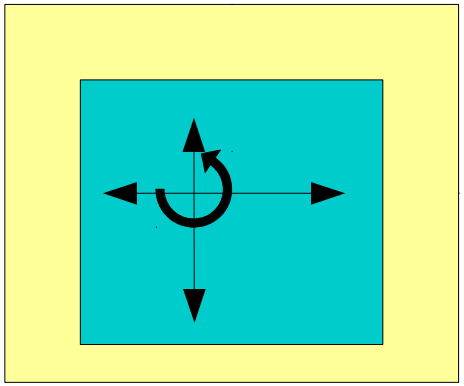
Propriedades fundamentais

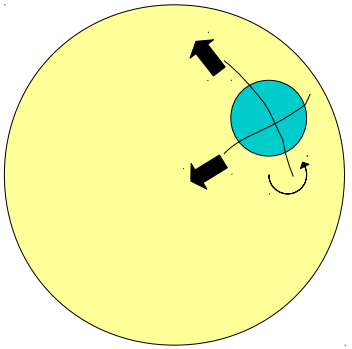
- Como determinar a Mobilidade de um mecanismo qualquer?

Propriedades fundamentais

- Critério de Kutzbach-Gruebler

$$M = 3\left(N_e - 1\right) - 2\,n_{P_1} - n_{P_2}$$





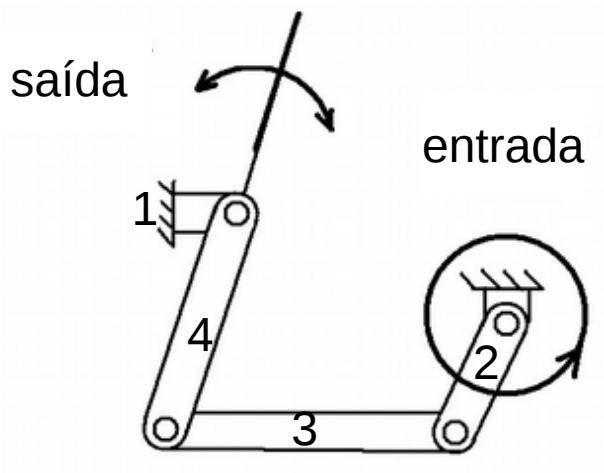
Espaços: Plano

Esférico

Propriedades fundamentais

- Critério de Kutzbach-Gruebler

$$M = 3\left(N_e - 1\right) - 2\,n_{P_1} - n_{P_2}$$



Quadrilátero articulado: 1234

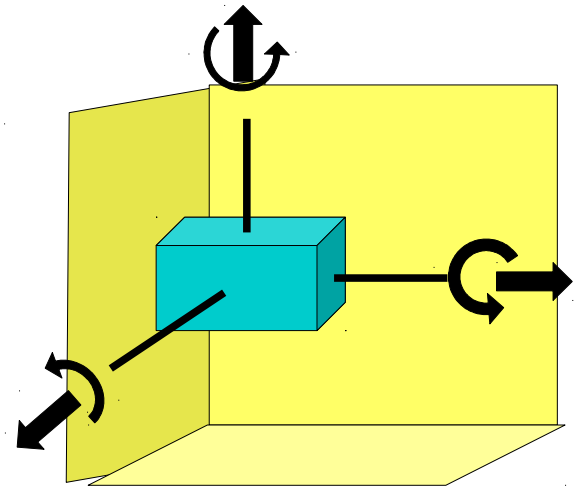
Ne=4
n_{P1}=4

M=3(4-1)-2.4-1.0=1

Propriedades fundamentais

- Critério de Kutzbach-Gruebler

$$M = 6(N_e - 1) - 5n_{P_1} - 4n_{P_2} - 3n_{P_3} - 2n_{P_4} - n_{P_5}$$

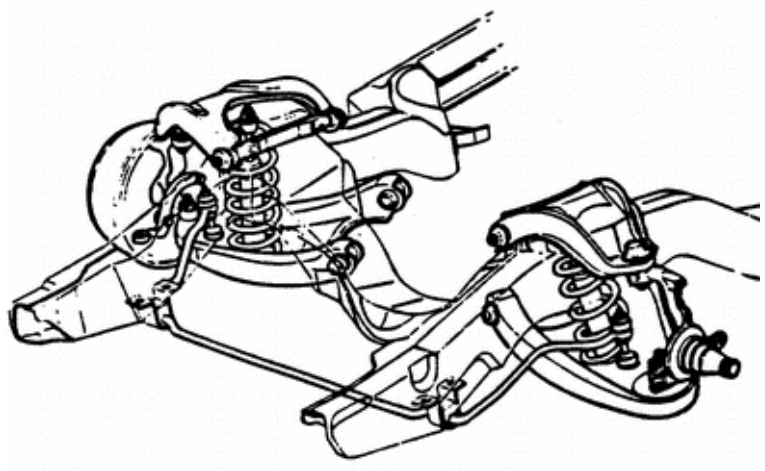


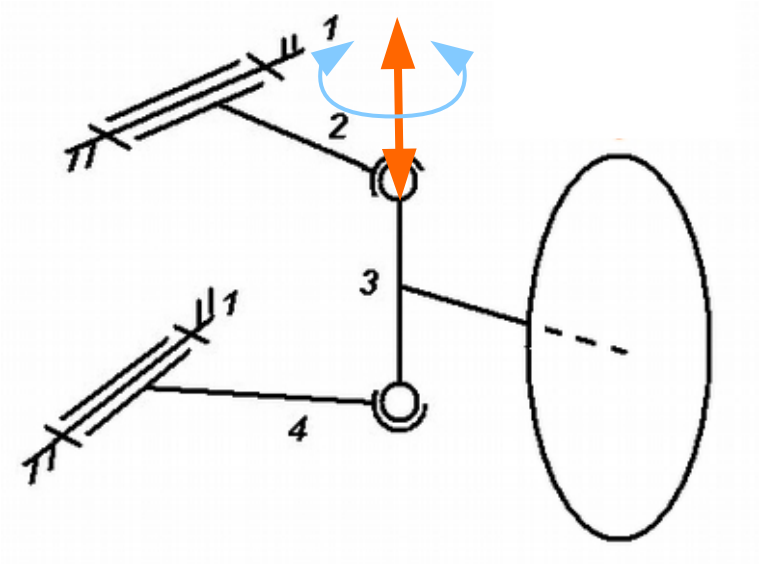
Espaço: Tridimensional

Propriedades fundamentais

- Critério de Kutzbach-Gruebler

$$M=6(N_e-1)-5n_{P_1}-4n_{P_2}-3n_{P_3}-2n_{P_4}-n_{P_5}$$



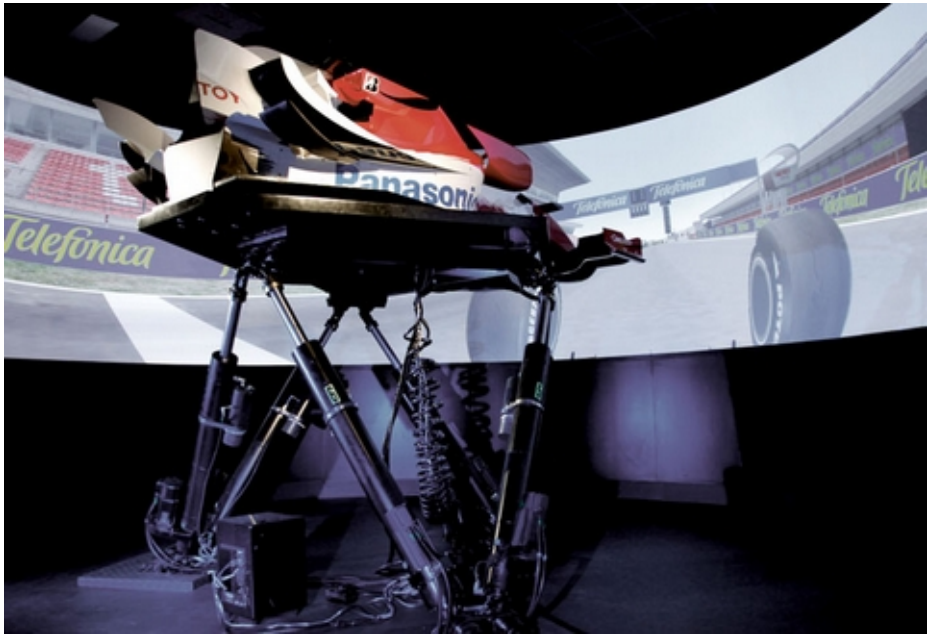


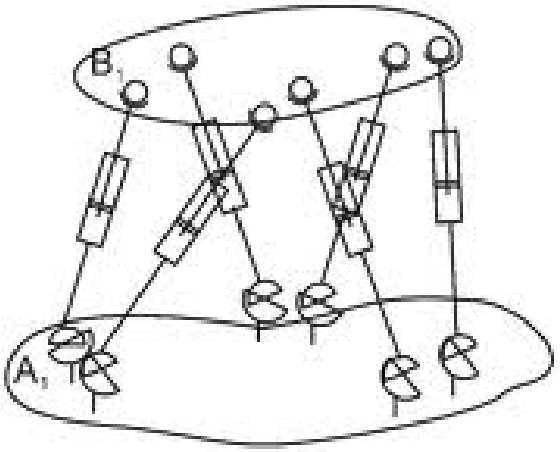
n=4
n_{P1}=2
n_{P3}=2

M=6(4-1)-5.2-3.2=2

Simulador de F1

Mobilidade = 6





6 UPS Posição/Orientação da PLATAFORMA MÓVEL

Análise X Síntese

O que é conhecido:	Análise	Síntese
tipo de mecanismo ?	sim	não
Dimensões e parâmetros?	sim	não
movimento de saída?	não	sim
motores e sua localização?	sim	não

Síntese

	M = 1	M > 1
No. de motores	apenas 1	≥ 2
Capacidade de alteração dos movimentos fornecidos	pequena	enorme
Complexidade mecânica	Maior	Menor
Complexidade do controle	nenhuma	elevada

Vídeos: 1 2

Síntese do tipo de mecanismo

Categorias de Mecanismos:

a) de cadeia cinemática aberta;

b) de cadeia cinemática fechada;

c) híbridos

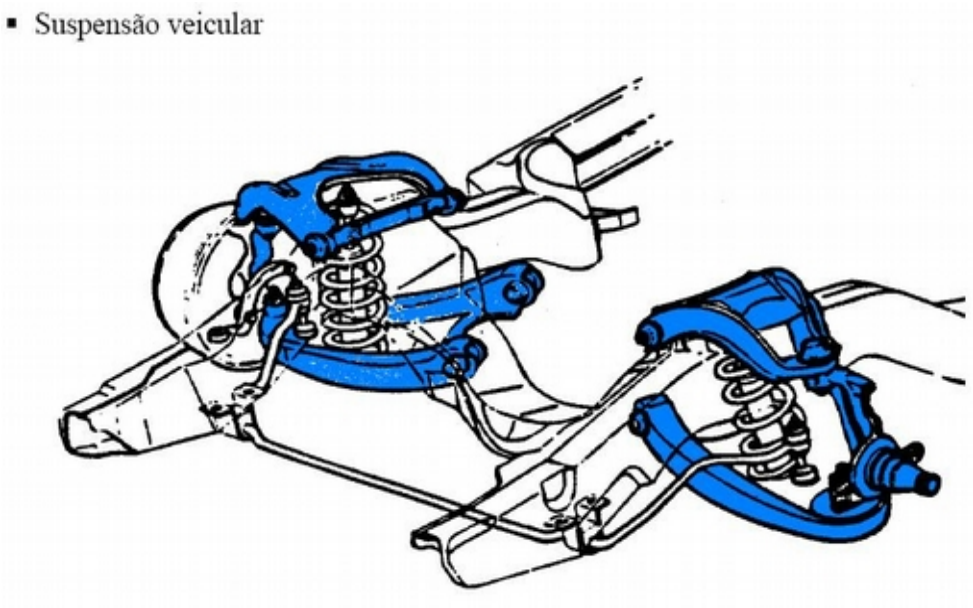
Categorias de mecanismos

a) de cadeia cinemática aberta

Categorias de mecanismos

b) de cadeia cinemática fechada

- Suspensão veicular



Categorias de mecanismos

c) híbrido

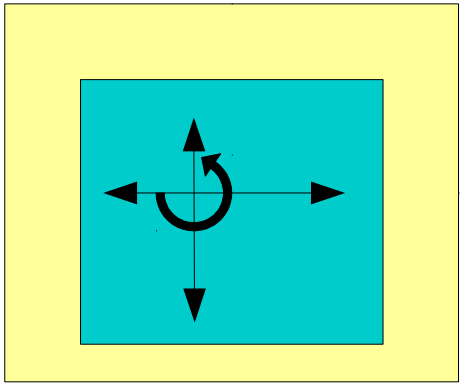
Métodos para síntese de mecanismos

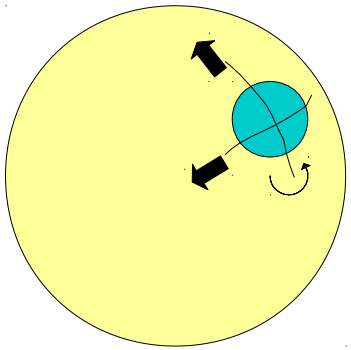
- Critério de Kutzbach-Gruebler
- Enumeração de cadeias ativas
- Adição de cadeia passiva
- Alternativo

Gruebler (1917) – Kutzbach (1929)

$$M=\lambda(n-1)+\sum_{j=1}^{\lambda-1}(\lambda-j)n_{P_j}$$

$$M=3(n-1)-2n_{P_1}-n_{P_2}$$





Espaços: Plano Esférico

Projete um robô manipulador, que opere no espaço plano, empregando o critério de Kutzbach-Gruebler, de tal maneira que sua garra execute deslocamentos lineares nas direções X e Y.

Projete um robô manipulador, que opere no espaço plano, empregando o critério de Kutzbach-Gruebler, de tal maneira que sua garra execute deslocamentos lineares
nas direções X e Y.

$M=2 \quad \lambda=3$

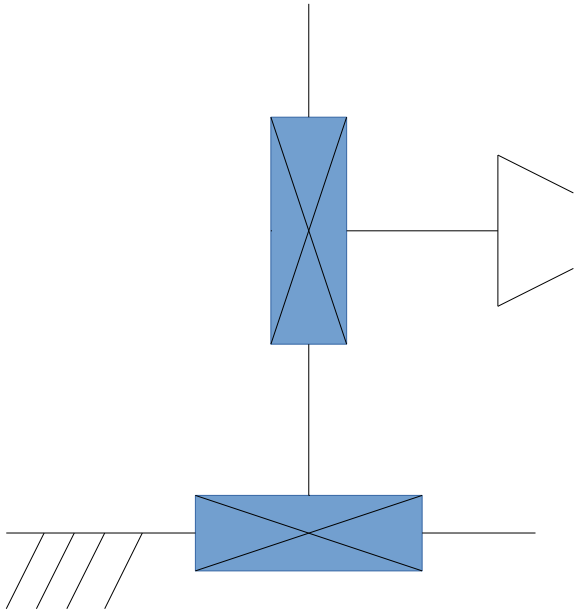
$$2 = 3\,(N_e - 1) - 2\,n_{P1} - n_{P2}$$

$$2 = 3\,(N_e - 1) - 2\,n_{P1}$$

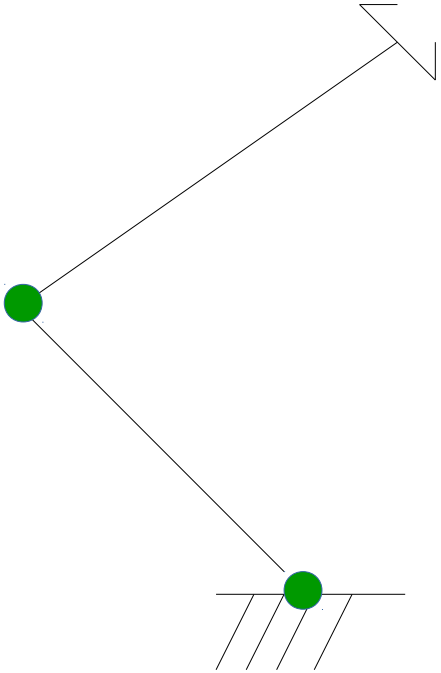
$$\boxed{5 + 2\,n_{P1} = 3\,N_e}$$

N_{p1}	N_e
1	7/3
2	3
3	11/3
4	13/3
5	5

$n_{p1} = 2 \quad Ne=3$

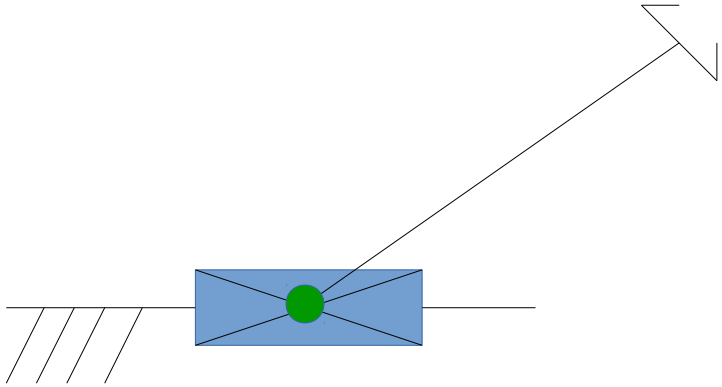


PP

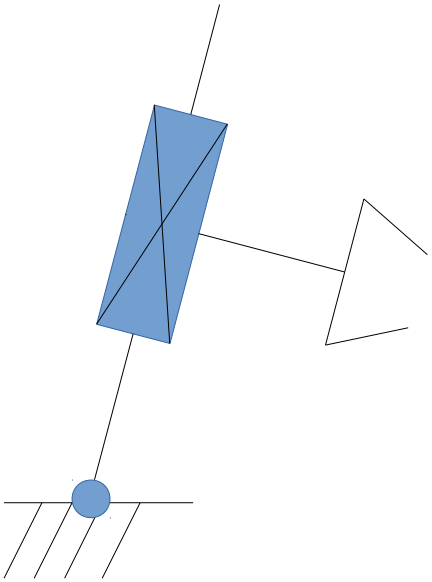


RR

$n_{p1} = 2 \quad Ne=3$

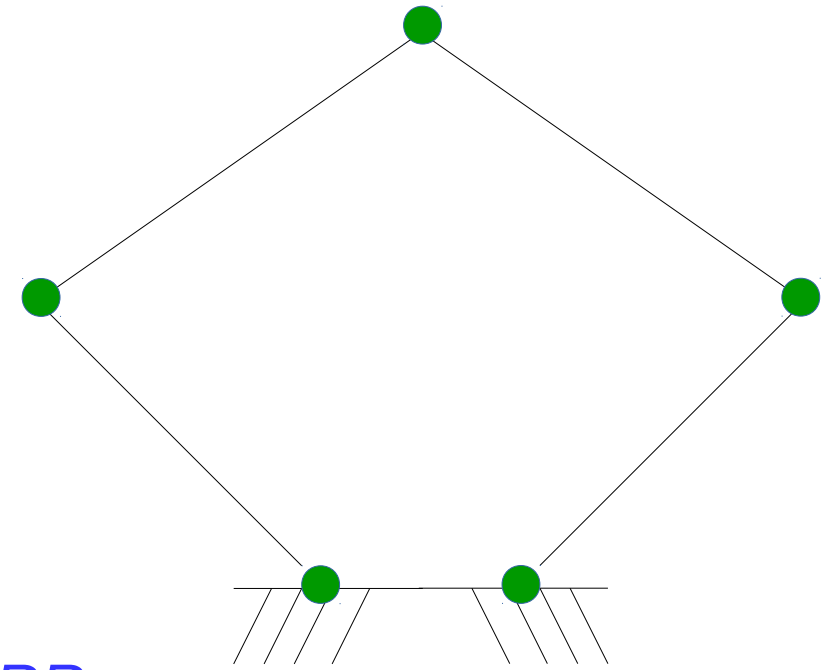


PR

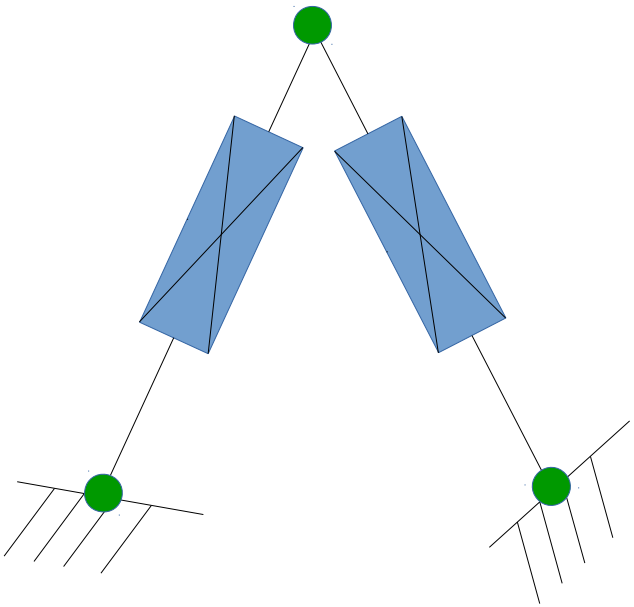


RP

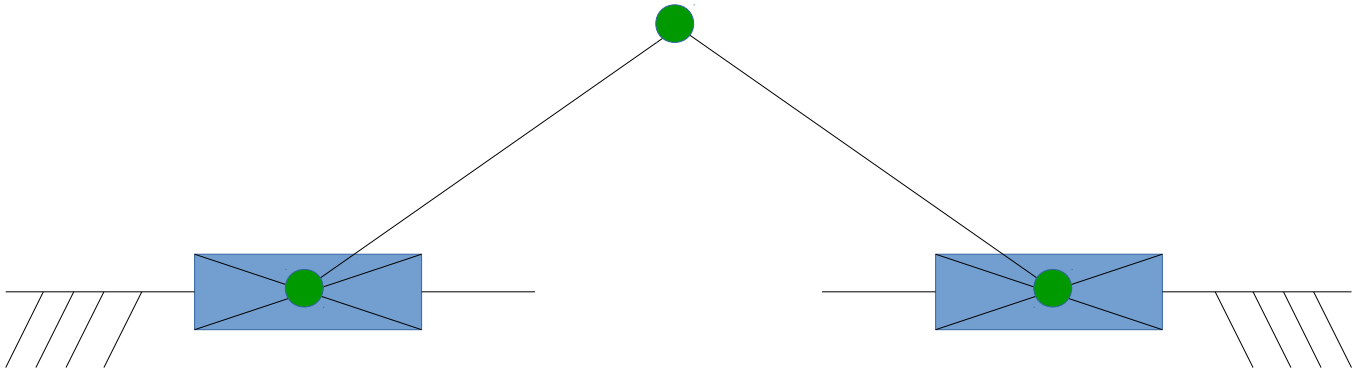
$n_{p1} = 5 \quad Ne=5$



RRRRR



RPRPR



PRRRP

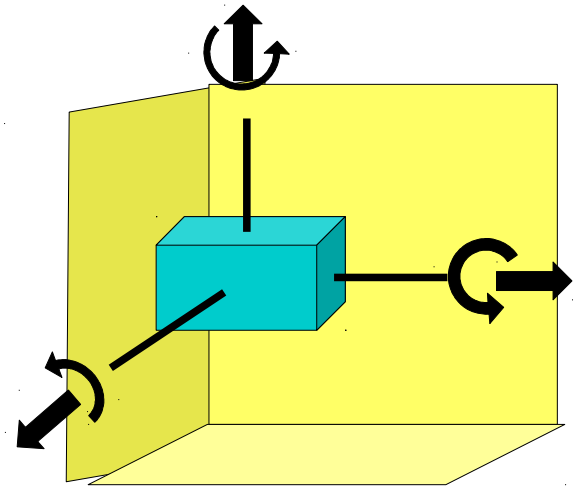
- > vídeo

Gruebler (1917) – Kutzbach (1929)

$$M=\lambda(n-1)+\sum_{j=1}^{\lambda-1}(\lambda-j)n_{P_j}$$

$$M=6(n-1)-5n_{P_1}-4n_{P_2}-3n_{P_3}-2n_{P_4}-n_{P_5}$$

Espaço Tridimensional



Gruebler (1917) – Kutzbach (1929)

Exemplo: $M = 3, \lambda = 6$

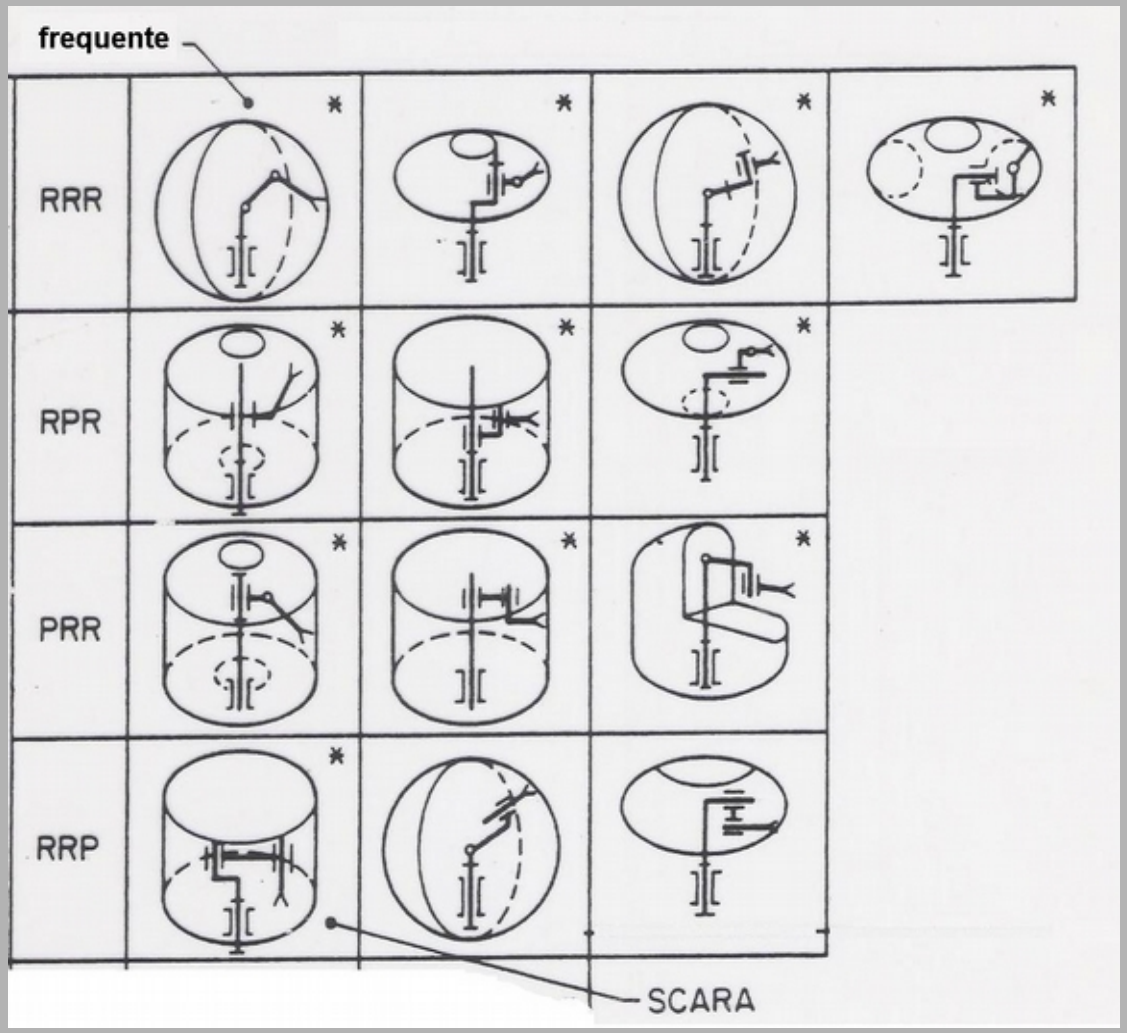
$$3 = 6(n-1) - 5n_{P_1} - 4n_{P_2} - 3n_{P_3} - 2n_{P_4} - n_{P_5}$$

Admitindo que $n_{P_2} = n_{P_3} = n_{P_4} = n_{P_5} = 0$

$$9 + 5n_{P_1} = 6n$$

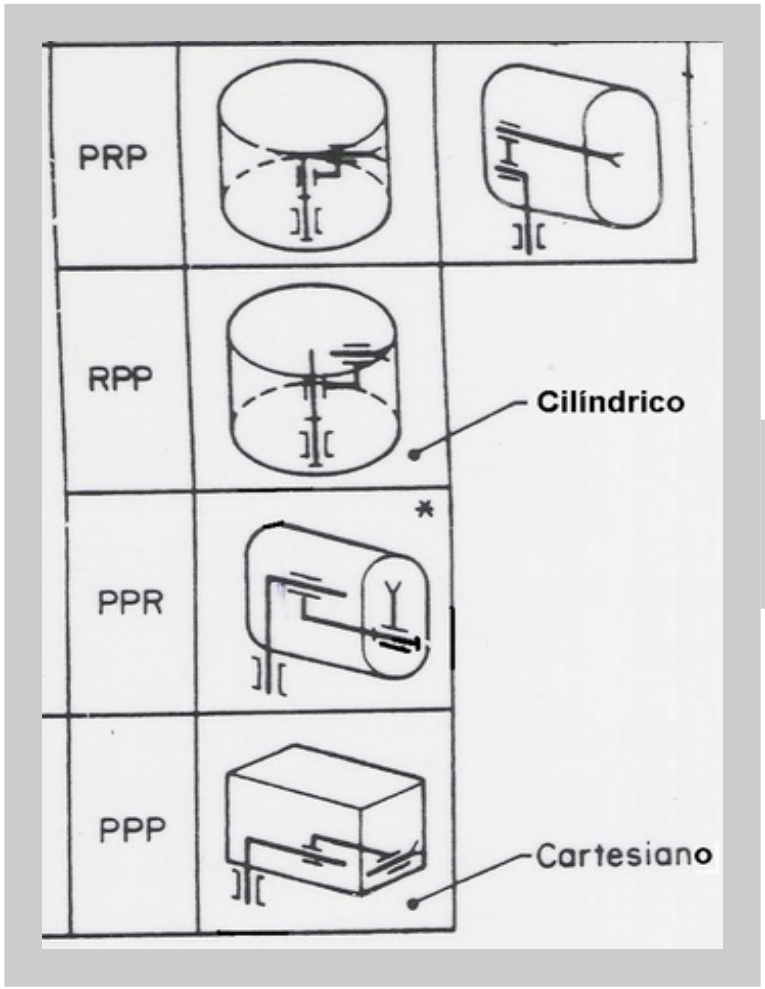
n_{P1}	n
1	7/3
2	19/6
3	4

$n_{P1}=3$, Junta do tipo P1∈ {P,R} ➡ há até 8 combinações possíveis



Cadeias abertas

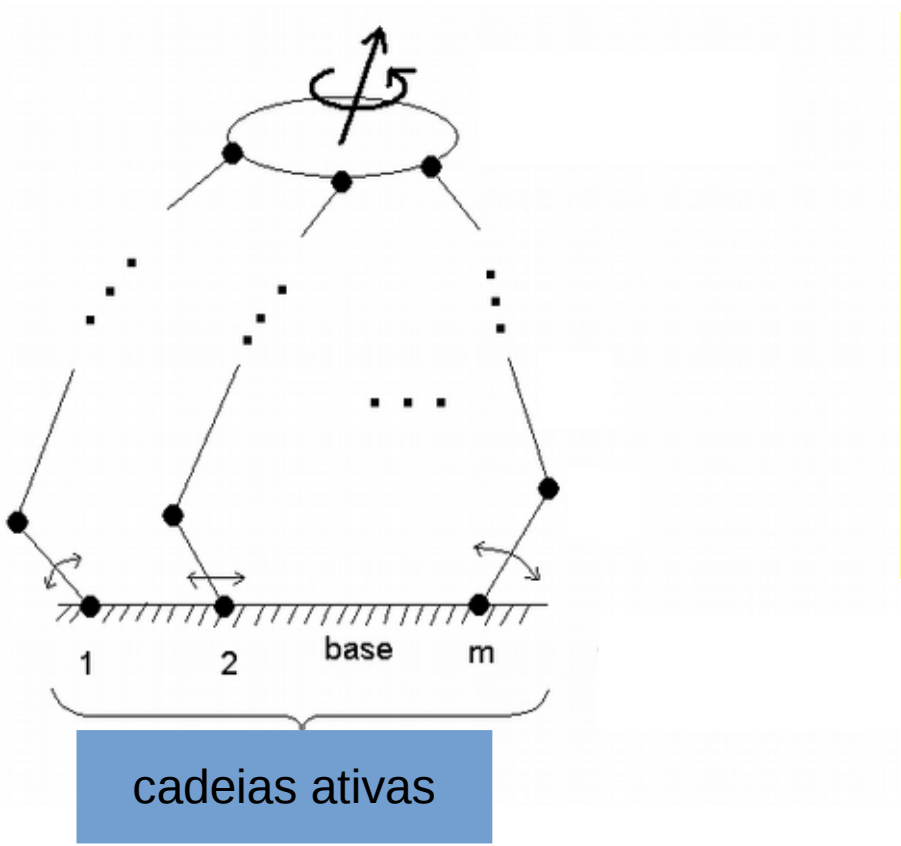
$n_{P1}=3$, Junta do tipo P1∈ {P,R} ⇒ há até 8 combinações possíveis



Cadeias abertas

As 3 juntas devem ser ativas!

Enumeração de cadeias ativas *(Hunt 1983, Tsai 1999)*

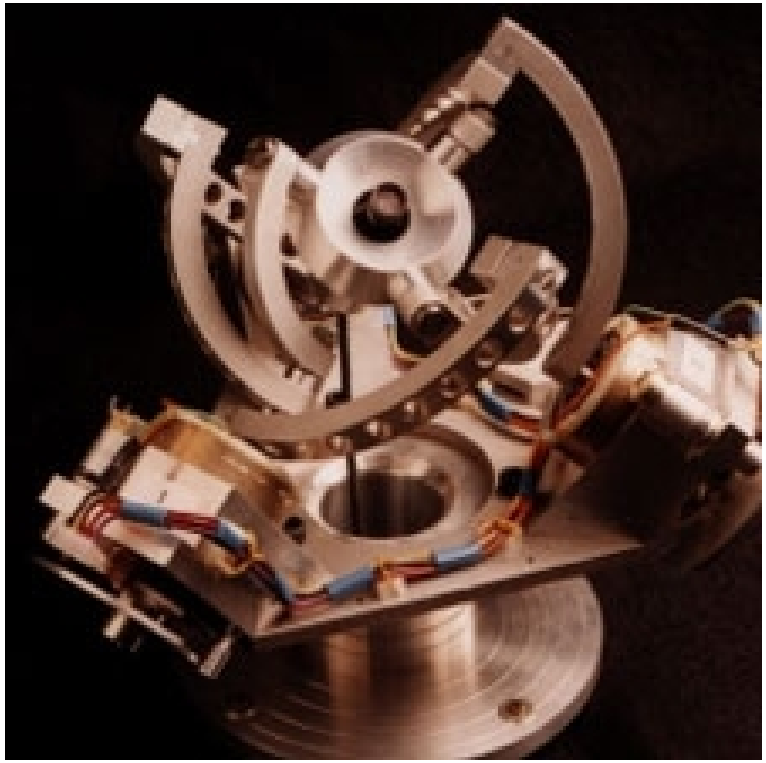


$$C_T = \sum_{k=1}^{m} C_k = (\lambda + 1) M - \lambda$$

$$M \leq C_k \leq \lambda \qquad m = M$$

Enumeração de cadeias ativas

	.λ	M	C_T	Exemplos
Planos	3	2	5	*RRRRR, PRRRP*
		3	9	*3 RRR, 3 PRR*
Esféricos	3	2	5	*RRRRR*
		3	9	*3 RRR*
Espaciais	6	2	8	*2 RPU*
		3	15	*3 RPS, 3 RUU, 3 UPU*
		4	22	*2 PRS + 2 PUS*
		5	29	*4 RUS+PPPU*
		6	36	*6 UPS, 6 RUS*

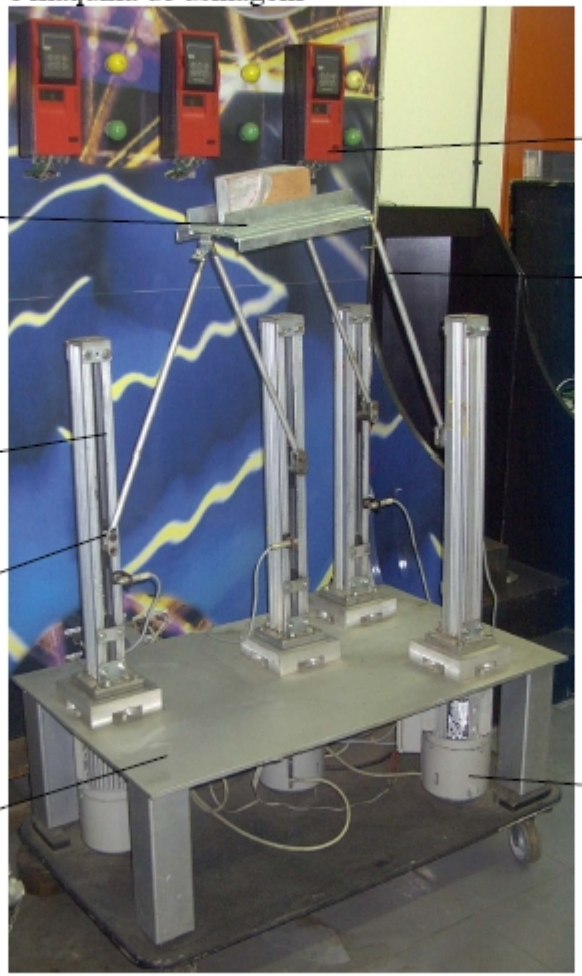


“AGILE EYE” robot

Protótipos

Tetraglide

- *Aplicações:* Entretenimento e máquina de usinagem

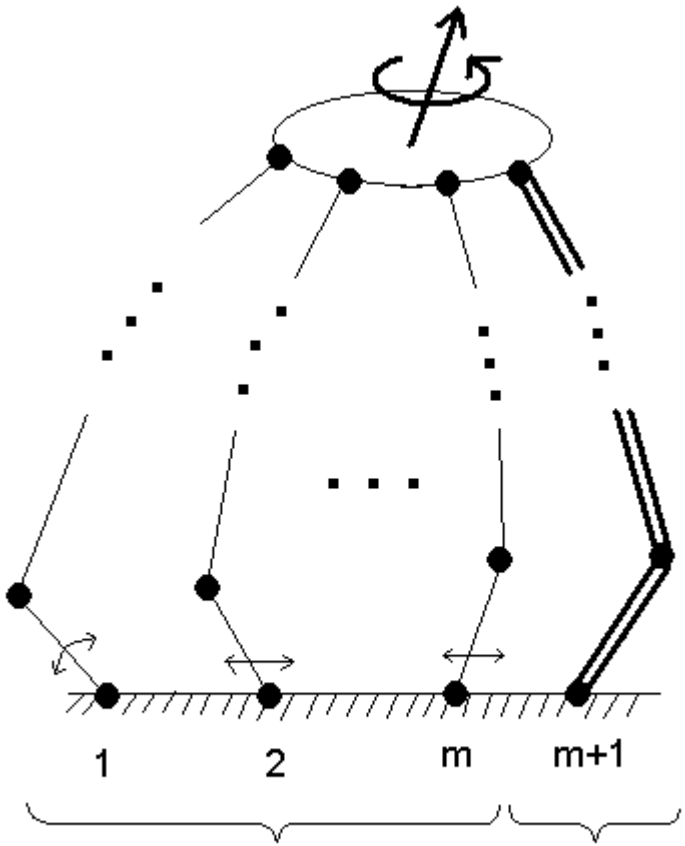


2PRS+2PUS

M=4 (2 Trans + 2 Rot)

> vídeos 1 2 3

Adição de cadeia passiva *(Zhang & Gosselin 2001, Brogardh 2002)*



Cadeias ativas

Cadeia passiva

$$C_{m+1} = M$$

$$C_1 = C_2 = \ldots = C_m = \lambda$$

$$C_T = (\lambda+1)\, M$$

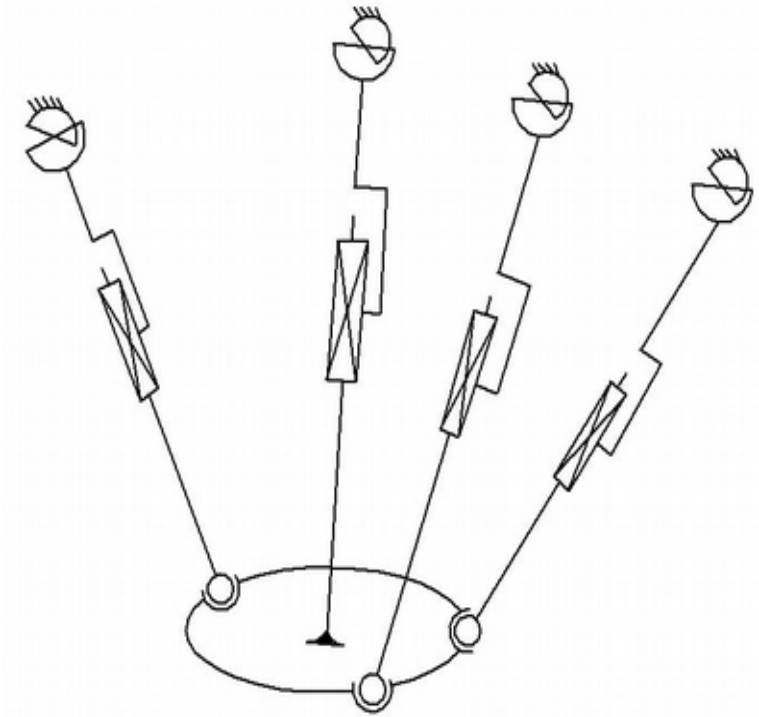
$$C_T = (\lambda+1)\, M$$

Mov. da plataforma

defin. cadeia passiva

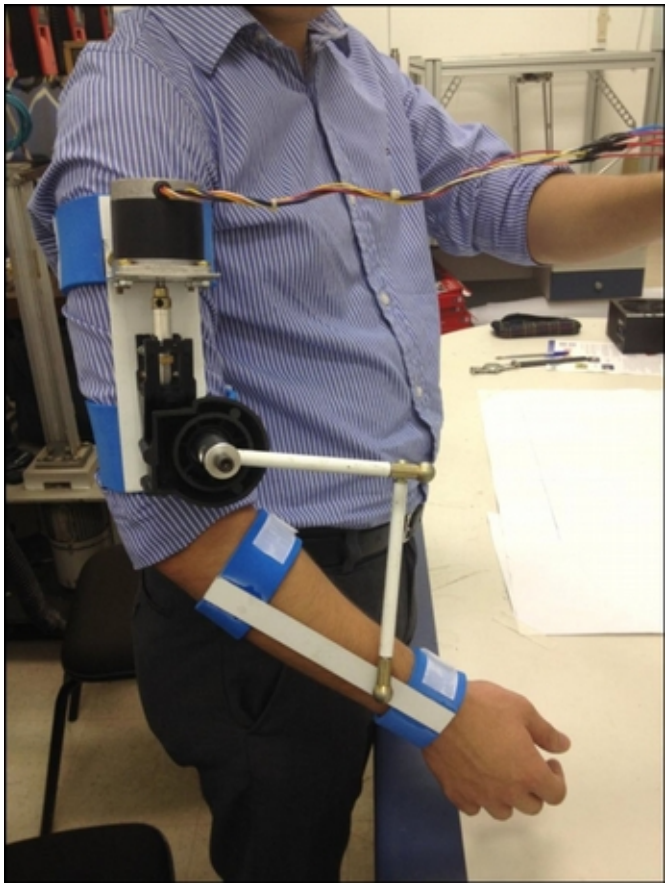
Adição de cadeia passiva *(Zhang & Gosselin 2001, Brogardh 2002)*

ABB Tricept



3 U<u>P</u>S + UP

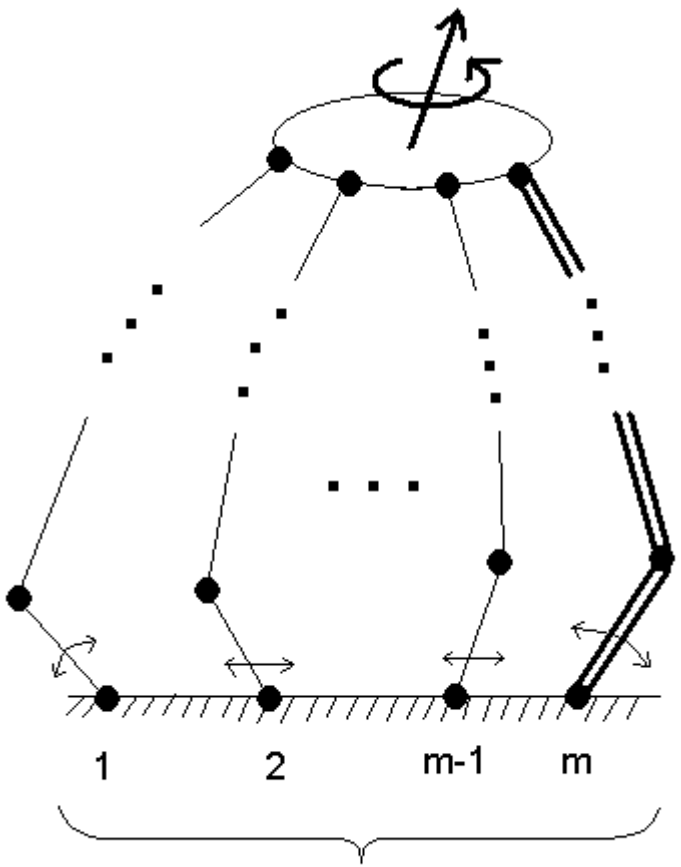
Adição de cadeia passiva *(Zhang & Gosselin 2001, Brogardh 2002)*



Órtese de mobilidade 1: movimento do cotovelo

> vídeo

Método Alternativo *(Li & Huang, 2003, Huang et al., 2005, Hess-Coelho, 2007)*



Cadeias ativas

$$C_m = M$$

$$C_1 = C_2 = \ldots = C_{m-1} = \lambda$$

Método Alternativo *(Li & Huang, 2003, Huang et al., 2005, Hess-Coelho, 2007)*

ELAU PacDrive Robot D2

$C_1 = 3$

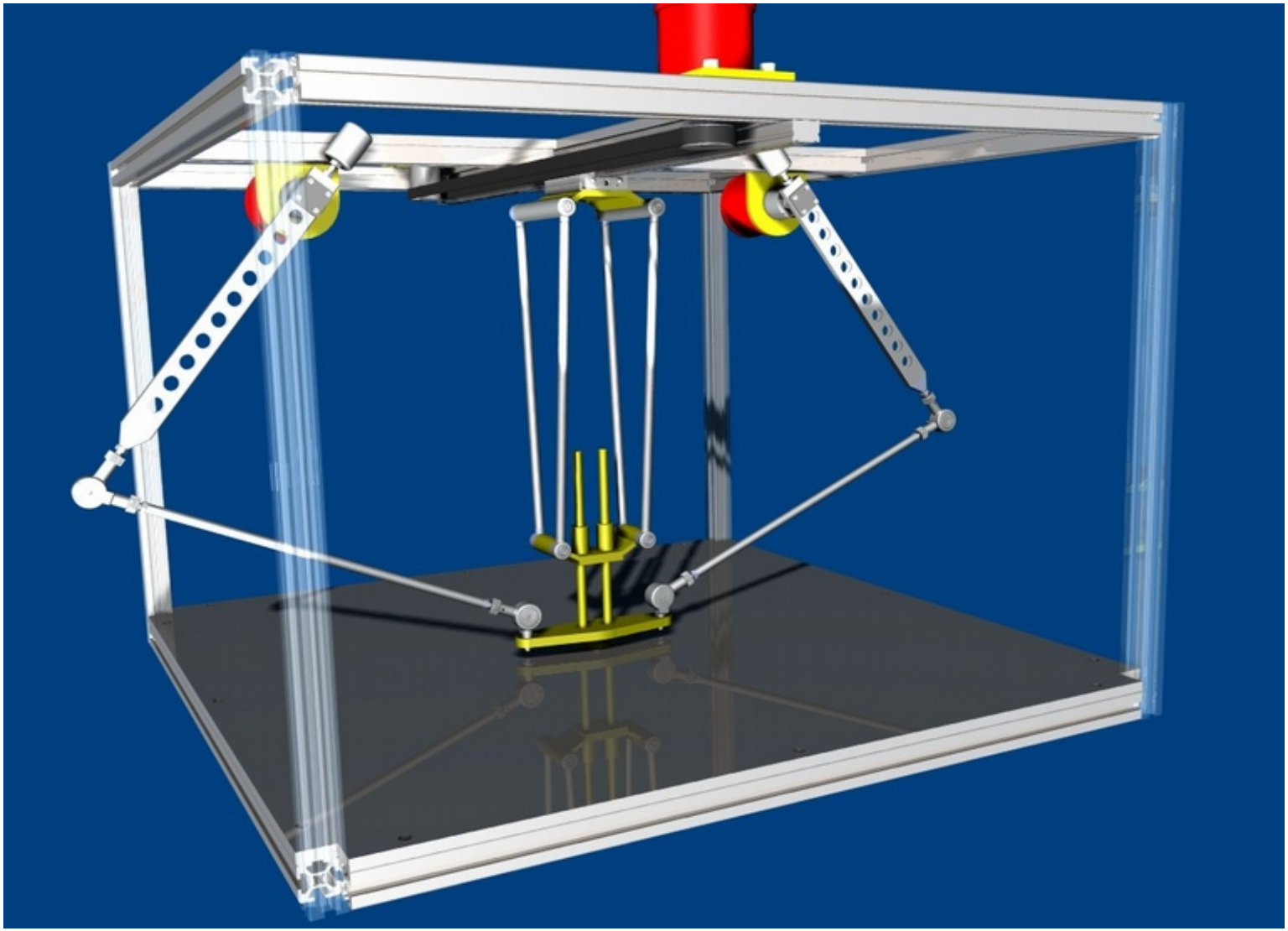
$C_2 = 2$

Cadeia 1: RRR

Cadeia 2: PaPa

restringe o movimento
da plataforma móvel a 2 translações

Método Alternativo *(Li & Huang, 2003, Huang et al., 2005, Hess-Coelho, 2007)*



> vídeo 1 2 3

Formas alternativas de ***atuação***

- Tipos de motores

- Localização dos motores

Formas alternativas de ***atuação***

- Tipos de motores :

  a) convencionais

  b) não-convencionais

- Localização dos motores

Formas alternativas de ***atuação***

- Tipos de motores :

  a) convencionais

  b) não-convencionais

- Localização dos motores:

  a) na base e peças móveis

  b) somente na base

Formas alternativas de ***atuação***

- Localização dos motores:

  a) na base e peças móveis

Formas alternativas de ***atuação***

- Localização dos motores:

  b) somente na base

Formas alternativas de ***atuação***

- Tipos de motores :

  a) convencionais

- Elétricos
- Hidráulicos
- Pneumáticos

Pesquisa: suspensão veicular

- Fernando Malvezzi (2014, Tese de doutorado, USP)

- Publicações recentes:

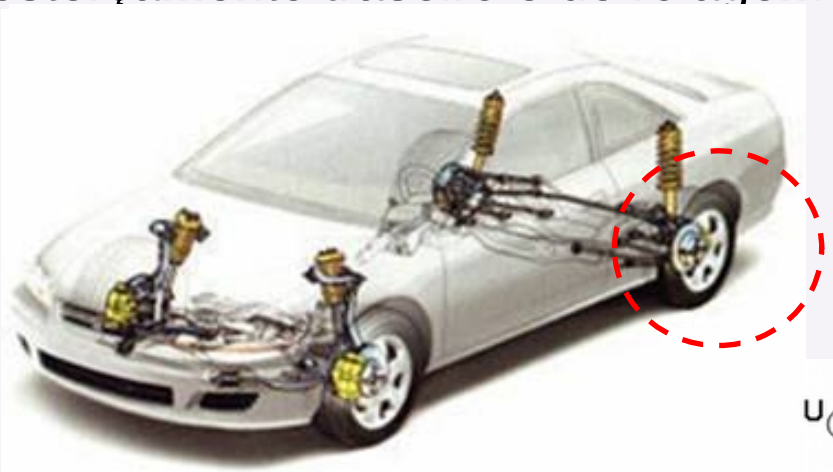
MALVEZZI, FERNANDO ; COELHO, TARCISIO ANTONIO HESS . Modelling, feasibility and performance analyses of a 3-DOF parallel mechanism employed in a rear vehicle suspension. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing - IJVSMT (Print), v. 10, p. 53, 2015.

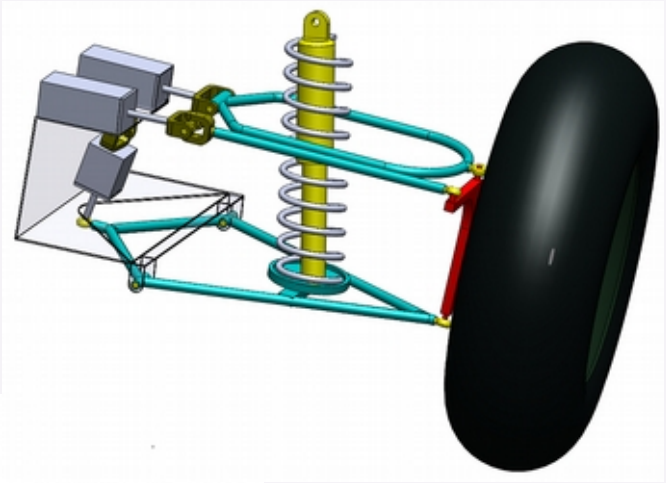
MALVEZZI, FERNANDO ; Coelho, Tarcisio Antonio Hess . Singularity and Workspace Analyses of a 3-DOF Parallel Mechanism for Vehicle Suspensions. Mechanisms and Machine Science. 1ed.: Springer International Publishing, 2015, v. 31, p. 311-319.

MALVEZZI, F. ; Coelho, T. A. H. . Topological Synthesis of a Novel Parallel Mechanism for Vehicle Rear Suspensions. Mechanisms and Machine Science. 1ed.: Springer Netherlands, 2014, v. 17, p. 33-40.

Pesquisa: suspensão veicular

Suspensão traseira independente, baseada em mecanismo de cadeia fechada, de mobilidade 3, capaz de ajustar simultaneamente os ângulos de cambagem, esterçamento traseiro e de rolagem.





modelo CAD

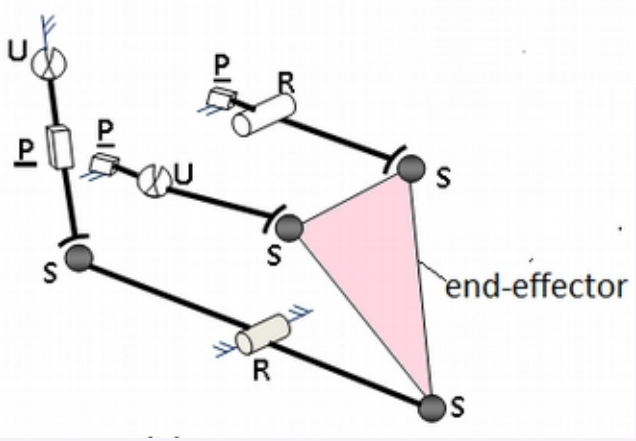


diagrama cinemático

Legenda:

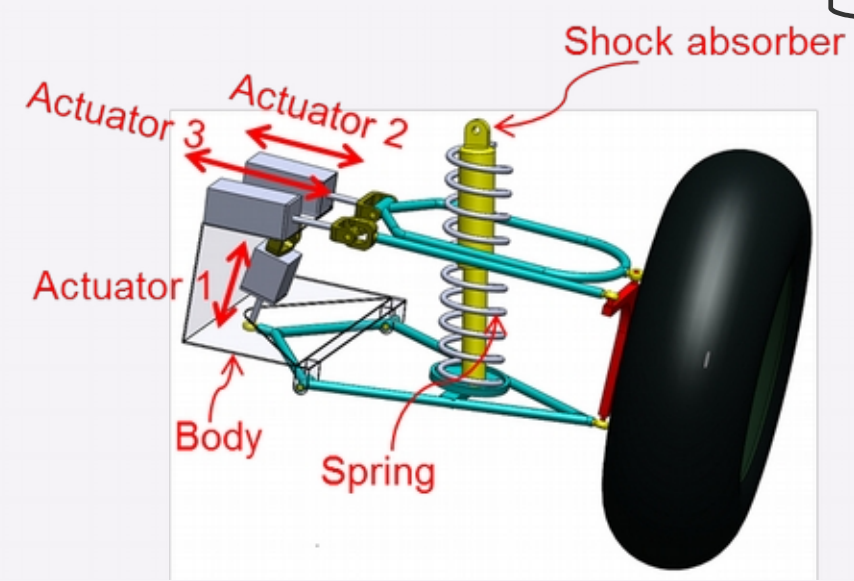
P: Atuator na junta prismática; U: junta universal; R: junta de Revolução; S: junta esférica

Pesquisa: suspensão veicular

- movimento ativo para ajustar a cambagem – atuadores 2 e 3

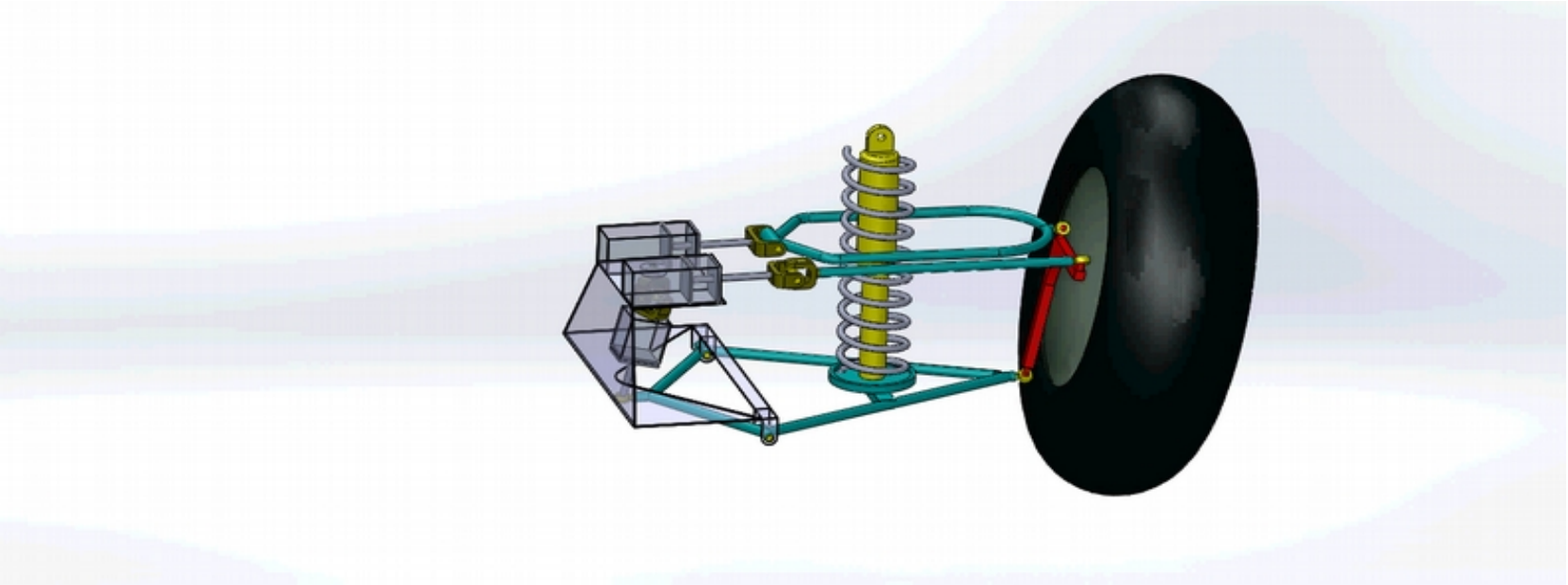
- movimento ativo para ajustar o esterçamento – atuador 3

- Deslocamento da roda
  - movimento passivo quando o veículo se desloca em linha reta (somente com as ações da mola e amortecedores)
  - movimento ativo para prover ação anti-rolagem (pelo atuador 1)



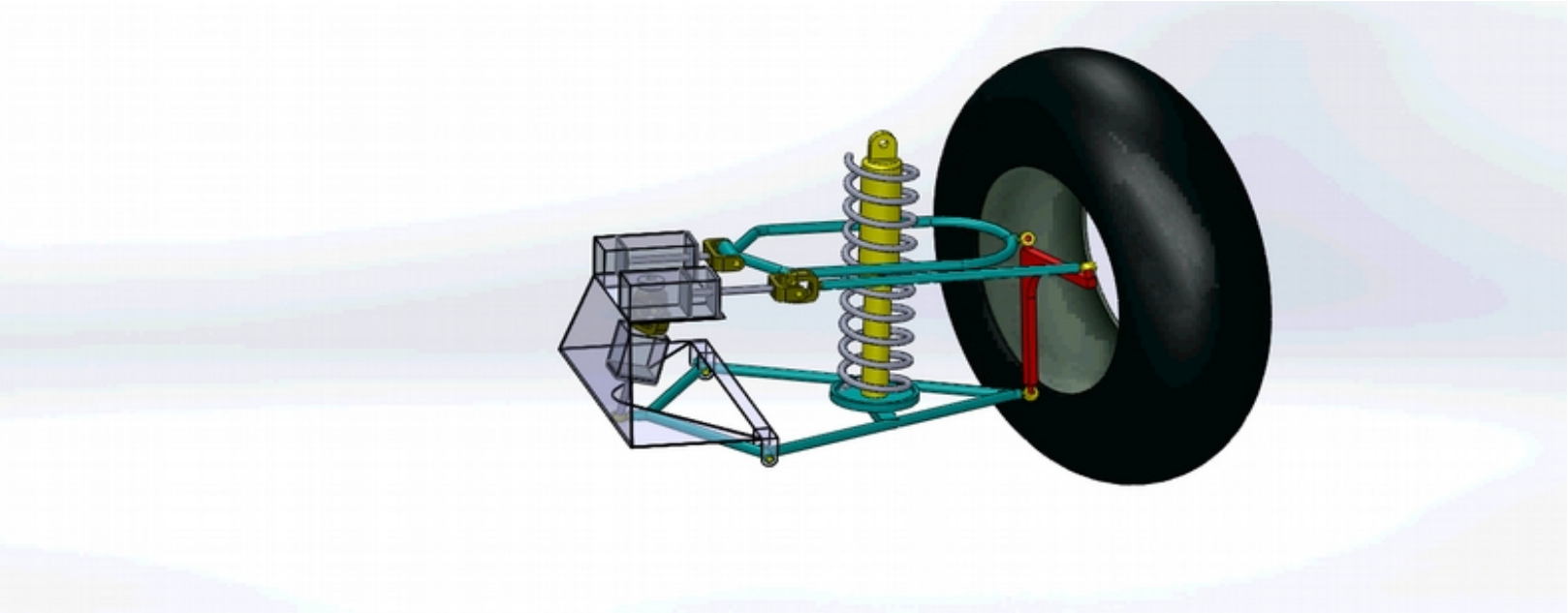
Pesquisa: suspensão veicular

- Variação de cambagem



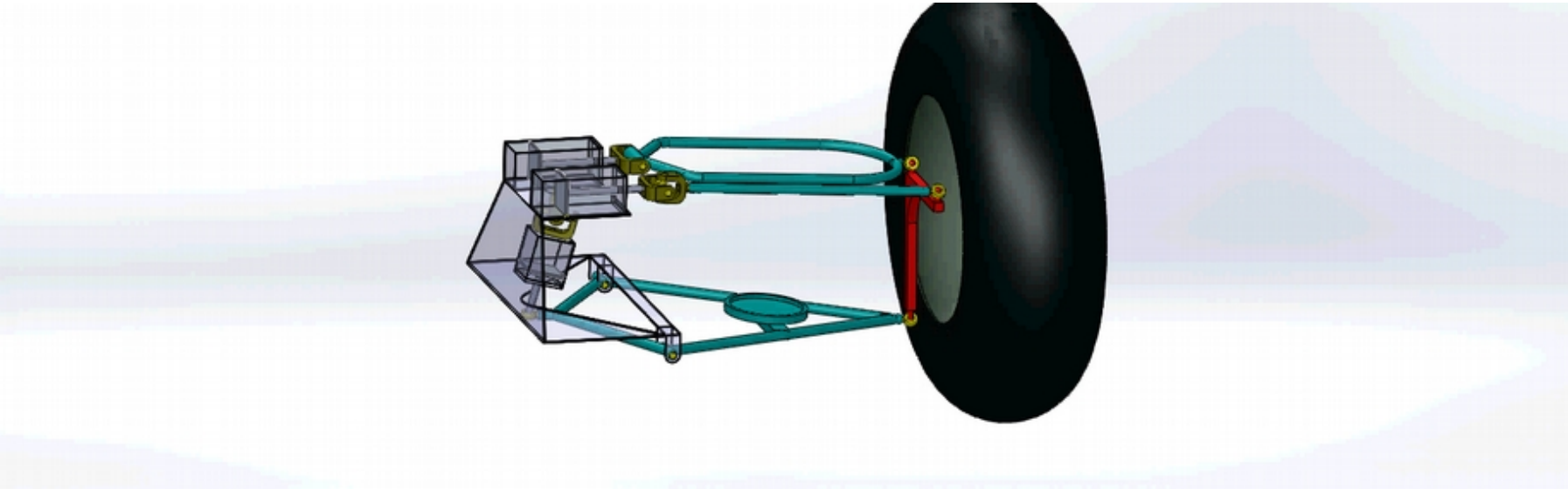
Pesquisa: suspensão veicular

- Ângulo de esterçamento

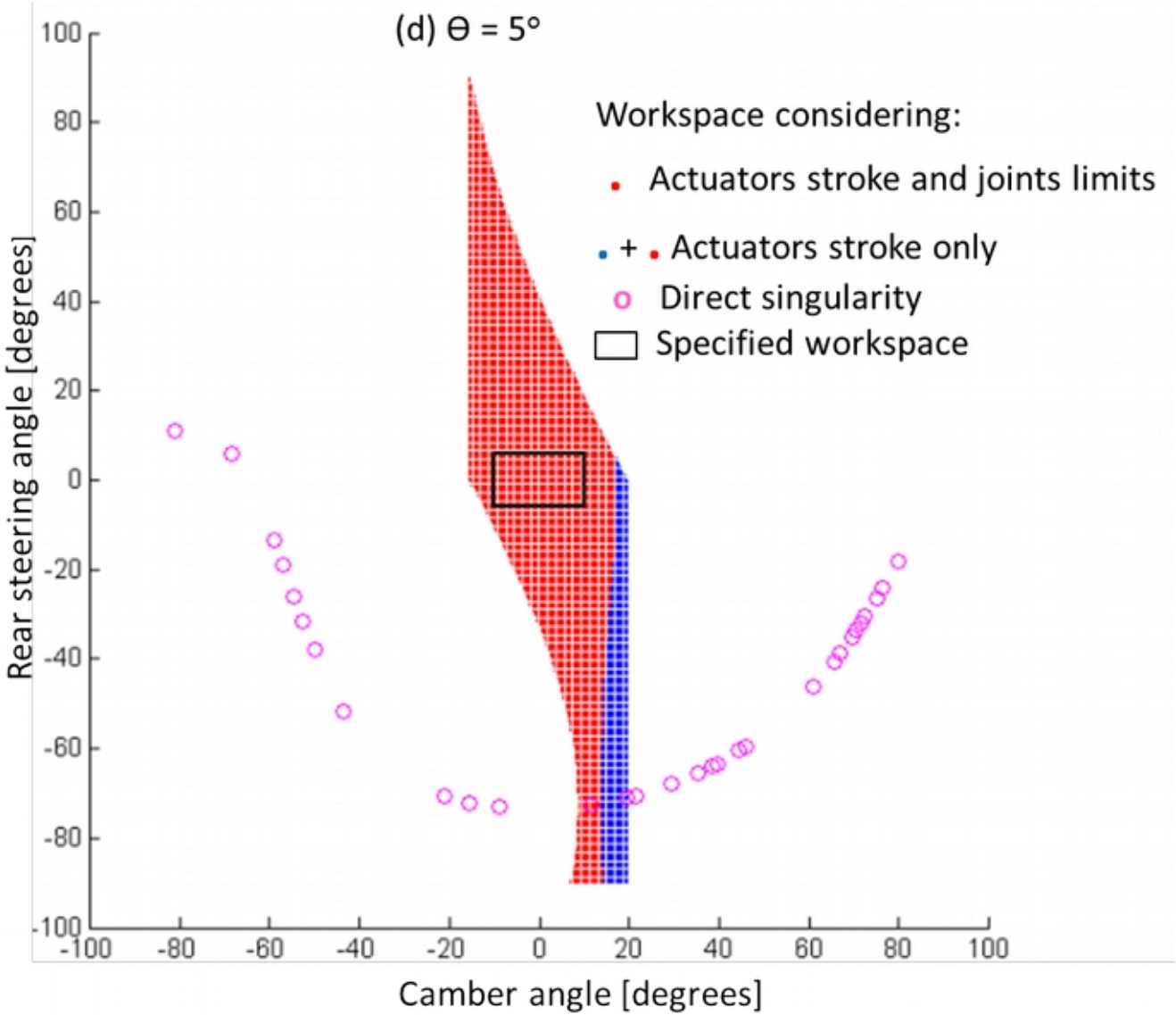


Pesquisa: suspensão veicular

- Atuação anti-rolagem



Pesquisa: suspensão veicular



Pesquisa: suspensão veicular

- Simulações:

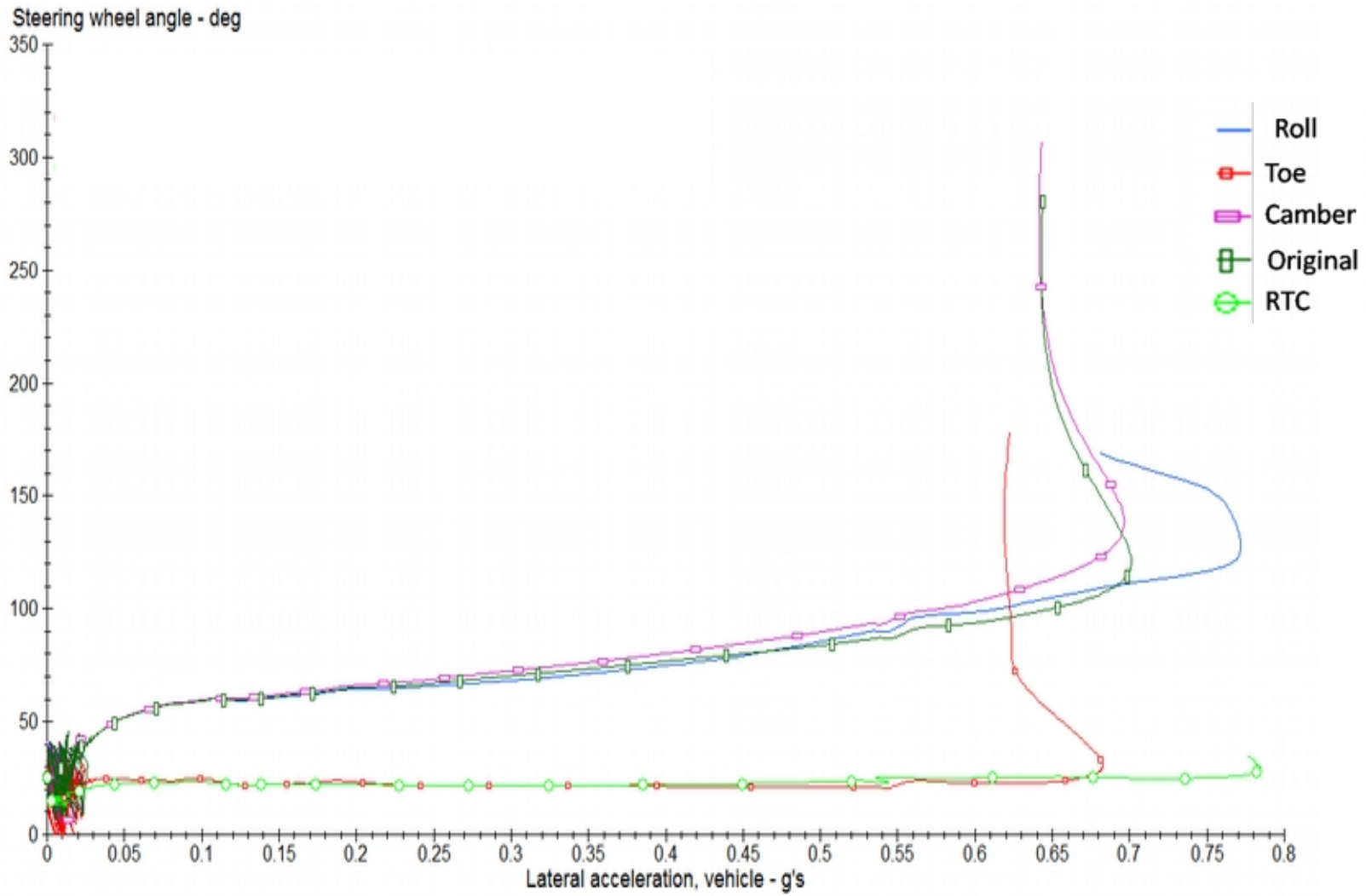
  - **Regime permanente (*Steady-state*, ISO 4138):**
  Curva de raio 50 m (constante)
  Incrementos de velocidade à taxa de 4 km/h por segundo.

  - **Anzol (*Fishhook*, NHTSA):**
  Todos os veículos simulados completaram a manobra à velocidade inicial de 50 mph (80 km/h), definida pela NHTSA
  Deslocamento angular do volante de 294 º

  - **Dupla mudança de faixa (ISO 3881-1):**
  Velocidade inicial de 120 km/h.

Pesquisa: suspensão veicular

- Manobra “steady-state”



Pesquisa: suspensão veicular

- Manobra “fishhook”

Pesquisa: suspensão veicular

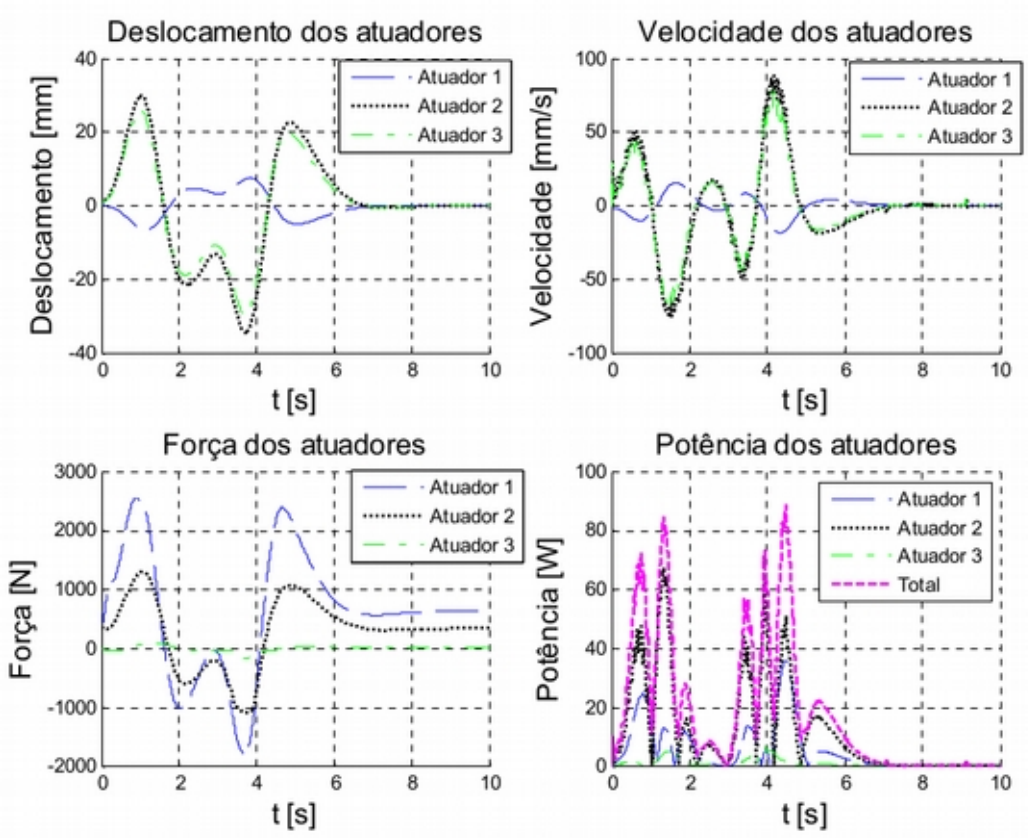


Figura 6-16- Requisitos dos atuadores na manobra dupla mudança de faixa

Pesquisa: suspensão veicular

Protótipo em desenvolvimento

Conclusão

- Conceitos fundamentais acerca dos mecanismos
- Métodos de síntese para o projeto de robôs
- Pesquisa recente sobre suspensão veicular