

# Tracção Eléctrica

2008 – 04/05



## O Segway

Recentemente surgiu a notícia da adopção pela Polícia Municipal de Lisboa de veículos eléctricos unipessoais que facilitam o policiamento da Baixa da cidade.

Este novo meio de transporte individual — o *SEGWAY™* — surgiu nos Estados Unidos da América em 2001 e tem tido apenas alguma aceitação apesar da grande propaganda e das sessões de demonstração efectuada ao longo destes anos.

Apresentando-se como uma plataforma accionada por duas rodas o Segway tem uma barra ligada à plataforma, sobre a qual assenta um guiador. Este veículo transporta o passageiro na plataforma, promovendo o seu auto-equilíbrio e deslocando-se a uma velocidade até 20 km/h.

Constitui assim um veículo eléctrico para transporte humano, auto-equilibrado.

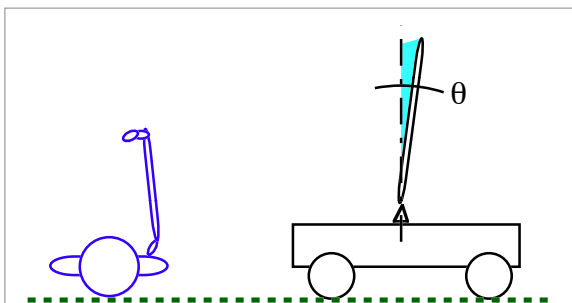
O Segway é apresentado como um veículo eléctrico capaz de promover um transporte sustentável e divertido.

### Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento do Segway pode ser explicado por analogia com o equilibrista de uma vara no dedo, ou pelo sistema de controlo clássico — o pêndulo invertido.

Quando uma pessoa pretende equilibrar uma vara na ponte de um dedo da mão necessita de se movimentar quando a vara sai da posição vertical e se inclina, para que a vara retome a posição vertical, e se mantenha equilibrada.

No estudo dos Sistemas de Controlo costuma-se apresentar o problema do equilibrista da vara por um sistema de controlo clássico — o *pêndulo invertido*. Considerando apenas o movimento segundo um eixo de coordenadas no plano da folha de papel (plano vertical), em cima de um



pequeno carro com duas rodas está em equilíbrio uma vara vertical; que terá de permanecer na posição vertical, ou o mais próximo possível, apesar das perturbações de equilíbrio que ocorrem.

De uma forma semelhante ao equilibrista da vara, que para manter a vara na vertical tem de movimentar a mão, assim para o pêndulo invertido se manter na vertical (ou próximo)



© Manuel Vaz Guedes, 2008

Assunto — 11/Mar/2008 e 25/Mar/2008

Tracção Eléctrica em Corrente Contínua  
Visita de Estudo: Museu do Carro Eléctrico e Instalações da STCP de Massarelos (Porto)



TRACÇÃO  
ELÉCTRICA

tem o carrinho de se movimentar de forma a contrariar a acção da perturbação de equilíbrio da posição vertical (*equilíbrio dinâmico*). No entanto no estudo deste sistema costuma-se considerar que o atrito da resistência do ar é desprezável assim como o momento de inércia das massas em movimento de rotação.

Para se verificar a estabilidade da posição (vertical) do pêndulo invertido há que definir uma estratégia de controlo do motor eléctrico que acciona o pequeno carro, de forma que:

- seja detectado o desvio angular  $\theta$  (o pêndulo sai da vertical)
- seja detectado o valor da velocidade do desvio angular  $d\theta/dt$  (o pêndulo cai rapidamente)
- esses dados sejam tratados
- actue sobre o motor eléctrico de forma a variar a velocidade no sentido e na amplitude próprios para corrigir o desvio.

Necessariamente que estas operações têm de ser feitas frequentemente de modo a que pequeníssimos desvios da vertical sejam imediatamente corrigidos evitando-se uma variação brusca da aceleração que será incómoda para o passageiro num veículo eléctrico de transporte.

Para se efectuar esta estabilização dinâmica do sistema é necessário que existam alguns elementos, que constituirão:

**O Sistema de Potência** — formado pela *fonte* transportável para alimentação em energia eléctrica, pelo sistema de controlo de potência e pelo *motor* ou *motores eléctricos* capazes de accionar o pequeno carro e a sua carga mecânica;

**O Sistema de Controlo** — no qual estão incluídos os diferentes *sensores* (unidades capazes de relacionar grandezas mecânicas com grandezas eléctricas), o *sistema de tratamento dos dados*, capaz de uma razoável frequência de actuação e normalmente com processamento digital e os *programas* capazes de coordenar e provocar a actuação do sistema controlado.

Claro que no caso do Segway o movimento do eixo referencial vertical se pode dar em qualquer direcção e isso leva a que o sistema de controlo, apesar de análogo ao do pêndulo invertido, seja mais complexo, quanto às variáveis controladas e à forma de as detectar e de as controlar.

### O Segway

O Segway é um veículo eléctrico, auto-equilibrado, para transporte pessoal, daí o seu nome comercial de *Segway™ Personal Transport*.

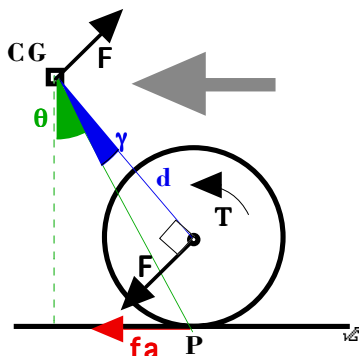
O Segway A, como veículo destinado a transportar uma pessoa em pé, é constituído por: uma plataforma B que transporte uma carga útil, que inclui a pessoa C, e que contacta com o solo através de duas rodas coaxiais R1 e R2; um sistema de accionamento eléctrico, formado por uma cadeia de potência e por um sistema de controlo que pela sua acção provocam o funcionamento equilibrado do veículo: locomoção e estabilidade. A pessoa impunha um guiador g que através de uma haste h estão ligados à plataforma B.

Atendendo a que o veículo A não apresenta estabilidade estática, existe um sistema de controlo que inclinando-se o condutor, e desequilibrando o sistema, é variado o binário aplicado pelos motores eléctrico às rodas R1 e R2, provocando uma variação da aceleração do veículo

{estabelecendo o equilíbrio e aumentando a velocidade de deslocação}.

A mecânica do movimento do veículo eléctrico permite estabelecer algumas das condições de funcionamento do Segway.

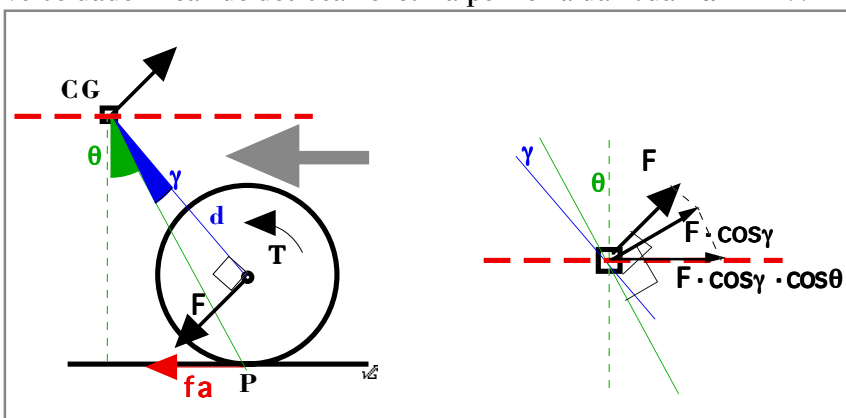
Considerando um veículo com uma roda rígida de raio  $R$ , que se desloca a velocidade constante



numa superfície plana horizontal mas que provoca atrito, e que tem o seu centro de gravidade  $CG$  a uma certa distância  $d$  do eixo de rotação da roda. A linha de ligação do centro de gravidade  $CG$  ao ponto de contacto da roda com a superfície de deslocamento  $P$  forma um ângulo  $\theta$  com a vertical. Devido ao tamanho da roda o segmento de recta  $d$  forma um ângulo constante  $\gamma$  com o segmento  $CG-P$ .

A roda é accionada por um motor eléctrico com um binário motor  $T$  que iguala um binário resistente  $Tr$  resultante de todas as resistências mecânicas ao movimento {apenas se considera a resistência mecânica de atrito}. Ao binário resistente  $Tr$  corresponde uma força resistente horizontal  $F$  actuante no centro de gravidade  $CG$ , tal que  $Tr = F \cdot d$ .

Como a superfície de rolamento apesar de horizontal oferece atrito ao deslocamento do móvel, existe uma força resistente ao movimento — força de atrito  $fa$  — que está aplicada no ponto de contacto entre a periferia da roda e o pavimento. Esta força de atrito (líquido) é proporcional à velocidade linear de deslocamento na periferia da roda  $fa = K \cdot v$ .



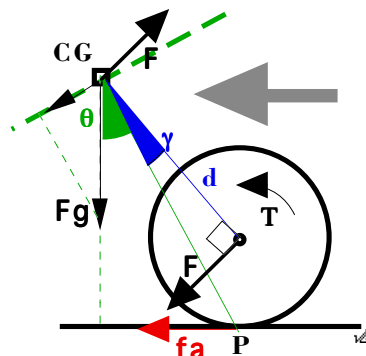
Para que o móvel se desloque a velocidade constante, é necessário que a acção resistente da força de atrito {dissipadora de energia} seja cancelada.

Essa força resulta da projecção segundo a direcção horizontal no ponto do centro de gravidade  $CG$   $(F \cdot \cos\gamma) \cdot \cos\theta$ , de uma

componente da força resistente  $F$  actuando segundo a direcção perpendicular à semi-recta  $CG-P$ ,  $(F \cdot \cos\gamma)$ .

Assim  $(F \cdot \cos\gamma) \cdot \cos\theta - fa = 0$  ou  $(F \cdot \cos\gamma) \cdot \cos\theta = fa$

Para evitar a queda do veículo é necessário que não actue qualquer força no ponto do centro de gravidade  $CG$ , segundo uma direcção perpendicular à linha  $CG-P$ , {que não exista um binário no ponto de contacto da roda com o pavimento  $P$  durante o movimento a velocidade constante}. Atendendo a que  $Fg \cdot \sin\theta$  é a componente “inclinante” da gravidade e  $(F \cdot \cos\gamma)$  é a componente “anti-inclinante” da força resistente no veículo devido à rotação da roda, a condição traduz-se por:  $Fg \cdot \sin\theta = (F \cdot \cos\gamma)$ .



As duas equações —  $(F \cdot \cos\gamma) \cdot \cos\theta = fa$  e  $Fg \cdot \sin\theta = (F \cdot \cos\gamma)$  — podem ser combinadas resultando  $Fg \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta = fa$  ou  $Fg \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta = K \cdot v$ .

Para pequenos valores do ângulo de inclinação verifica-se que  $(\sin\theta)$  é aproximadamente igual

a  $\theta$ ) e então

$$\theta \approx (K/Fg) \cdot v \quad \text{ou } \theta \text{ é proporcional a } v$$

Assim um sistema de controlo para impor estabilidade ao sistema responderá a um aumento da inclinação com um aumento da velocidade do sistema.

O sistema de controlo irá actuar sobre o sistema de accionamento que nestes veículos é constituído por uma fonte de alimentação e por motores eléctricos que actuam separadamente sobre cada roda do veículo **R1** e **R2**, comandados por um sistema de controlo de potência.

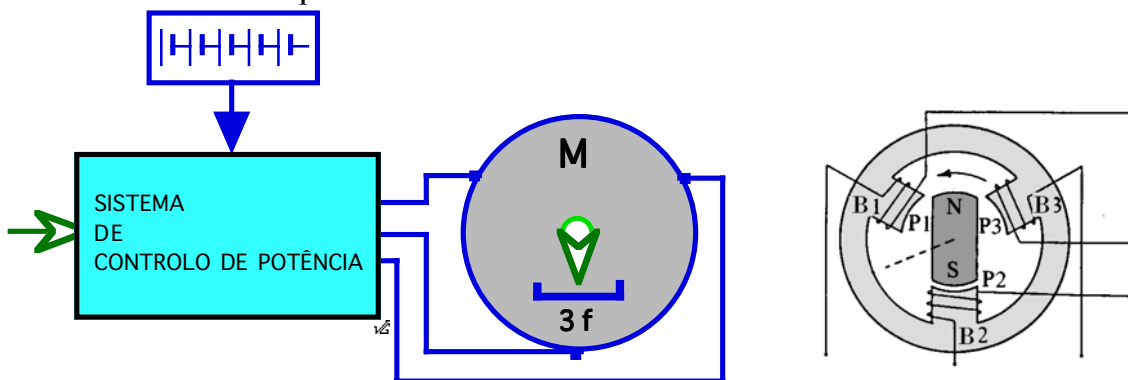


A fonte de alimentação é constituída por baterias (2) de acumuladores recarregáveis do tipo hidrido de níquel metálico ou (NiMH) ou iões de Lítio (Li-ion). A capacidade da fonte de alimentação dá para 13 a 19 km com uma bateria NiHM e 25 a 39 Km com uma bateria Li-ion, variando ainda com a tara do veículo. {Como qualquer sistema com fonte de alimentação recarregável é susceptível de não ter energia eléctrica armazenada suficiente para realizar a viagem !... (autonomia !)}.

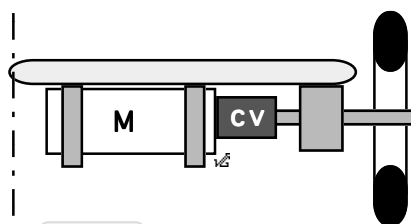
Os motores eléctricos, cada um adaptado a uma roda, pode accionar essa roda a velocidades diferente daquela a que é accionada a outra roda.

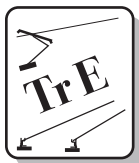
Fundamentalmente, e devido à acção do sistema de controlo, quando o passageiro sobe para a plataforma e inclina a haste do guiador para a frente, os motores rodam as rodas para a frente de forma a evitar a queda do veículo {e do passageiro !}. Da mesma forma, quando o passageiro sobre a plataforma inclina a haste do guiador para trás, os motores rodam as rodas para trás, de forma a evitar a queda do veículo {e do passageiro !}. Quando o condutor actua no guiador para virar à direita ou à esquerda os motores rodam uma das rodas mais rapidamente do que a outra, ou rodam as rodas em sentidos opostos.

O motor eléctrico normalmente utilizado é do tipo motor eléctrico de corrente contínua sem escovas (*brushless*), com três conjuntos de bobinas no enrolamento do induzido (3f). Como motor sem escovas necessita para funcionar de uma informação sobre a posição angular ou a velocidade do veio da máquina.



Um motor com parâmetros típicos para esta aplicação será um motor de 1,5 kW,  $U = 12 \text{ V}$ ,  $n_0 = 5600 \text{ rot/min}$ ,  $\eta = 74\%$ . O motor eléctrico acciona uma roda (**R1** ou **R2**) através de uma caixa de velocidades que altera a velocidade do veio da roda relativamente velocidade do veio do motor.





O motor eléctrico pode ser controlado, através do sistema de controlo de potência em tensão (velocidade), ou em corrente (binário); fundamentalmente o sistema de controlo de potência tem uma acção de comutação da alimentação de um dos circuitos (B1, B2, ou B3) do induzido do motor no momento assinalado pelos sensores e comandado pelo sistema de controlo.

O sistema de controlo de potência exerce uma acção de comutação da alimentação das bobinas do motor eléctrico pela fonte de energia eléctrica. Essa comutação é comandada por um amplificador que é realimentado com informação proveniente do sistema de controlo de potência — cria-se um pequeno circuito fechado e interior de controlo que funciona na gama do 1 kHz. O amplificador de controlo também recebe informação dos sensores que actuam no veio do motor eléctrico.

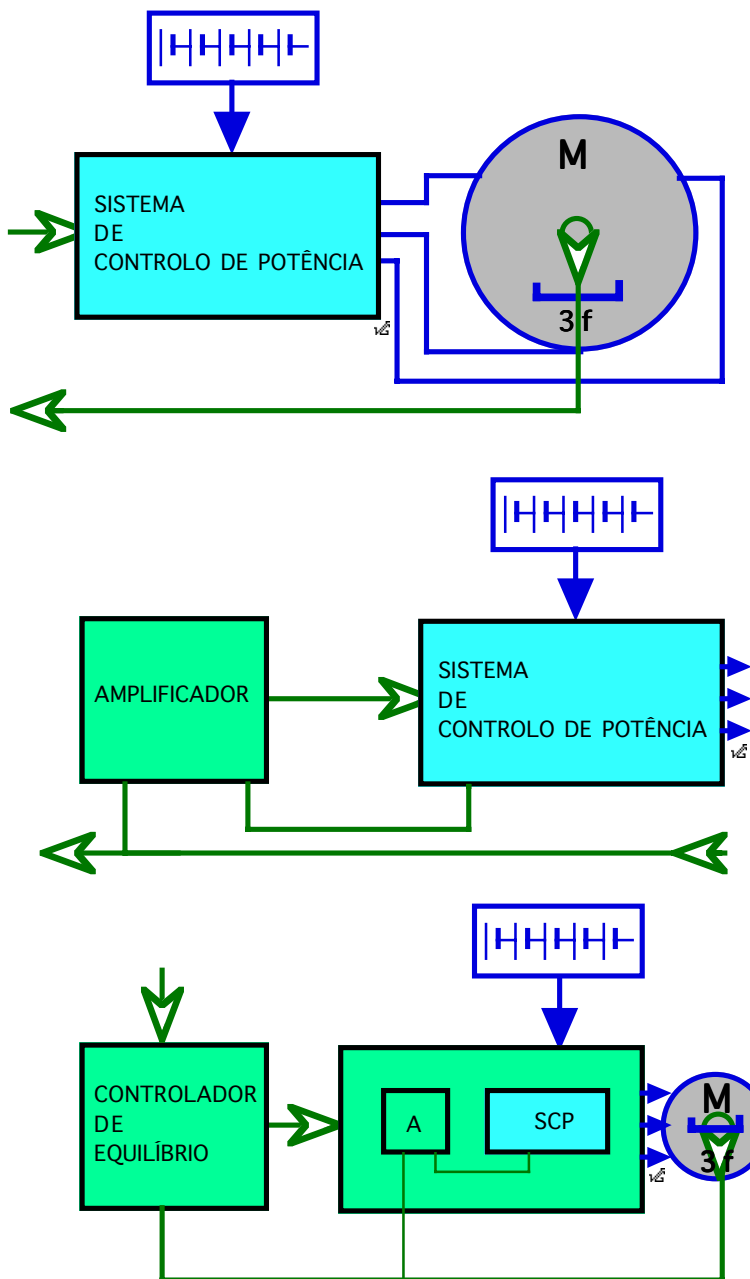
O sensor aplicado no veio do motor, que pode ser um taquímetro, um codificador, ou um sensor de efeito de Hall {mais barato}, fornece informação sobre a posição do veio do motor ou sobre a sua velocidade angular. Conhecendo-se apenas a posição do veio é possível, por diferenciação, determinar a velocidade angular do veio.

Esta informação é fornecida também ao controlador de equilíbrio que, nos termos da estratégia de controlo adoptada, comanda as correcções a fazer ao regime de alimentação do motor para manter o movimento e a estabilidade do veículo.

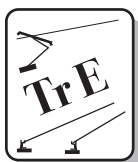
Existe um outro circuito fechado de controlo (exterior) que trabalha numa banda de frequências própria do processador de equilíbrio — 20 a 30 Hz

Um simples algoritmo para obter equilíbrio quando a plataforma está em movimento consiste em ligar o binário aplicado pelo motor na roda à inclinação e à variação da inclinação, assim como ao movimento em frente ao longo do solo e à velocidade linear, depois de definidos os valores de base.

© Manuel Vaz Guedes, 2008







## Transporte Sustentável

O Segway como veículo eléctrico é apresentado com um veículo capaz de uma baixa emissão de gases tóxicos uma vez que sendo um veículo que transporte consigo a energia eléctrica a consumir, apenas se consideram os gases libertados no processo de produção da energia eléctrica na Rede Geral do País.

Considerando que cada carga das duas baterias de íões de Lítio demora oito a dez horas, a partir de uma tomada da rede eléctrica, os 1,04 kWh de energia que carrega, e que com essa carga o veículo é capaz de percorrer 32,5 km, o Segway consumirá 0,032 kWh/km.

Mas 1 kWh de energia eléctrica durante a sua produção liberta 443 g de gases (CO<sub>2</sub> e gases com efeito estufa); ou seja o Segway é responsável pela produção de 14,2 g de gases nocivos por km percorrido. Valor muito inferior ao de outros veículos com motor térmico (automóvel = 377,7 g/km; motorizada = 109,5 g/km, ou veículos híbridos (126,9 g/km).

Para além de contribuir para a redução da emissão de gases com efeito estufa o Segway apresenta um bom rendimento energético. Considerando que no processo de produção e transporte de energia eléctrica existe um rendimento da ordem dos 30%, são necessários 11,9 MJ de energia primária para obter 1 kWh de energia na tomada de carga das baterias do Segway. Durante a carga das duas baterias, para percorrer 32,5 km, consumir-se-iam 12,38 MJ de energia primária. (automóvel = 54,5 MJ; motorizada = 61,6 MJ)

Comparando com outros veículos dotados de motor térmico verifica-se que o rendimento energético do Segway é bom.

– MVG –

