Tracção Eléctrica

Aplicações Rodoviárias

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

JOÃO MARTINS

Tração Ferroviária

2018/2019

Tipos de transporte

- Passageiros,
- Carga,
- Longa distância.

Transporte de passageiros

- Todas as formas de transporte, publico ou privado, de pessoas por ar, terra ou água, com ou sem horário marcado;
- Inclui:
  - Transporte não motorizado e pedestre,
  - Transporte de bagagem.
- Pode ser: urbano, rural, de costa, local, longa distância ou transfronteiriço.

Transporte de carga

- Movimento de matéria prima, peças ou equipamentos do fornecedor para o consumidor e de novos e usados produtos de consumo de volta ao fornecedor,
- Movimento de cargas:
  - Tem aumentado nas forma intermodal e multimodal;
  - Utiliza sistemas locais, regionais, nacionais e internacionais.

Transporte de longa distância

- Transporte de passageiros e carga em grandes distâncias:
  - 80 km ou mais (rodoviário e ferroviário);
  - Mais de 250 km (aéreo e marítimo).

Objectivos do transporte

- Objectivos
  - Eficiência;
  - Segurança de pessoas e bens;
  - Aspectos ambientais;
  - Aspectos económicos;
  - Informação e consciência;
  - Equidade e acessibilidade.

Transporte motorizado

- História:

Máquina a vapor: carvão + água

Motor eléctrico: bateria de ácido de chumbo

Motor de combustão interna:

Ignição (Ciclo Otto): gás / gasolina

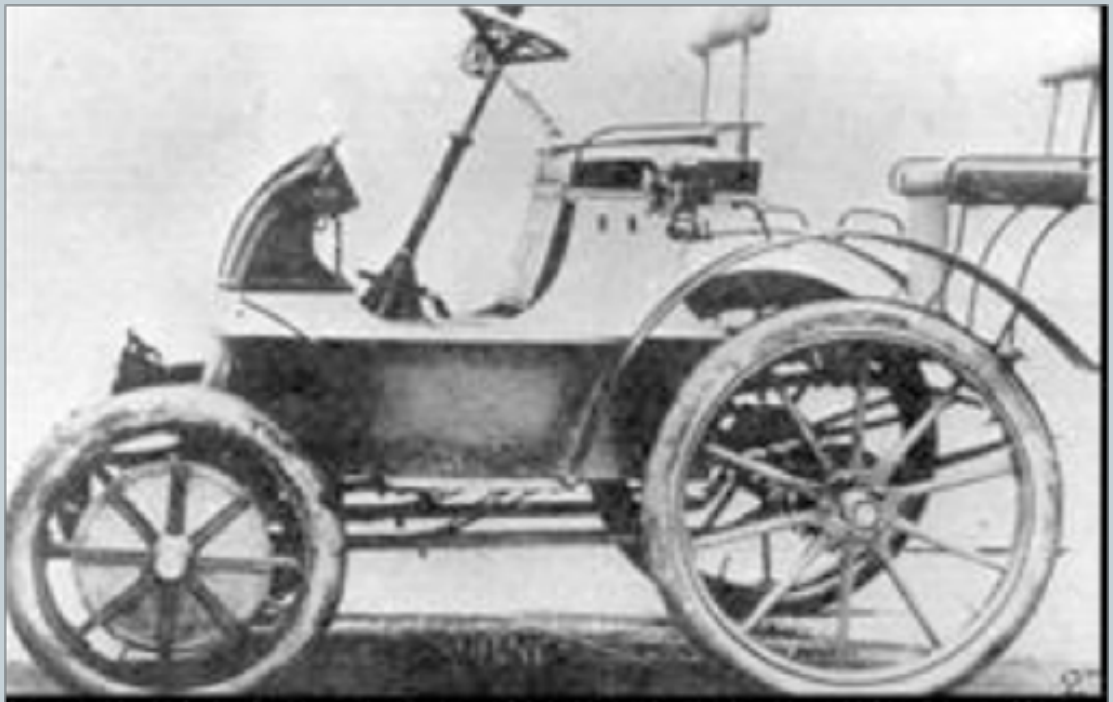
Inflaming (Diesel): petroléo

O caso rodoviário...

Locomotiva Cugnot: França, 1771
(2 cilindros) D=325 mm / y=378 mm => 5 HP (3,7 kW).
massa = 12 toneladas v_{MAX} = 3,5 km/h.
Projecto militar destinado a derrubar paredes



O caso rodoviário...



The early 1900's Lohner-Porsche, originally electric-powered, then with an internal combustion engine powering hub-mounted electric motors.

No inicio do século XX o número de veiculos eléctricos nos Estados Unidos da América superava os equipados com motor de combustão interna.

O caso rodoviário…





Dinâmica do veículo

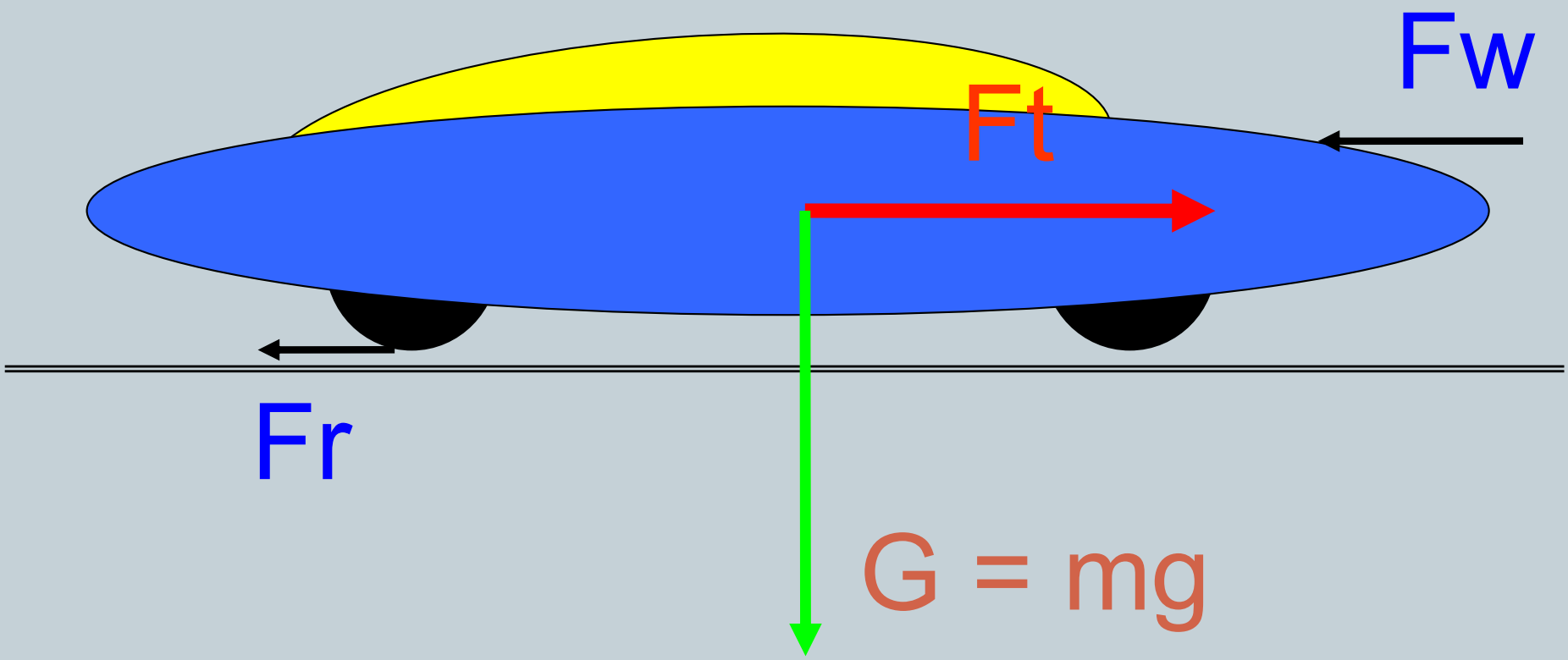
- Aceleração
- Travagem
- Velocidade constante
- Descida
- Subida

1885 Daimler Benz



Balanço dinâmico de forças simplificado

$$Ft = Fr + Fw + Fa$$



Dinâmica do veículo

$Fr = kr\ m\ g$

$Fw = \frac{1}{2}\ Cx\ Sx\ v^2$

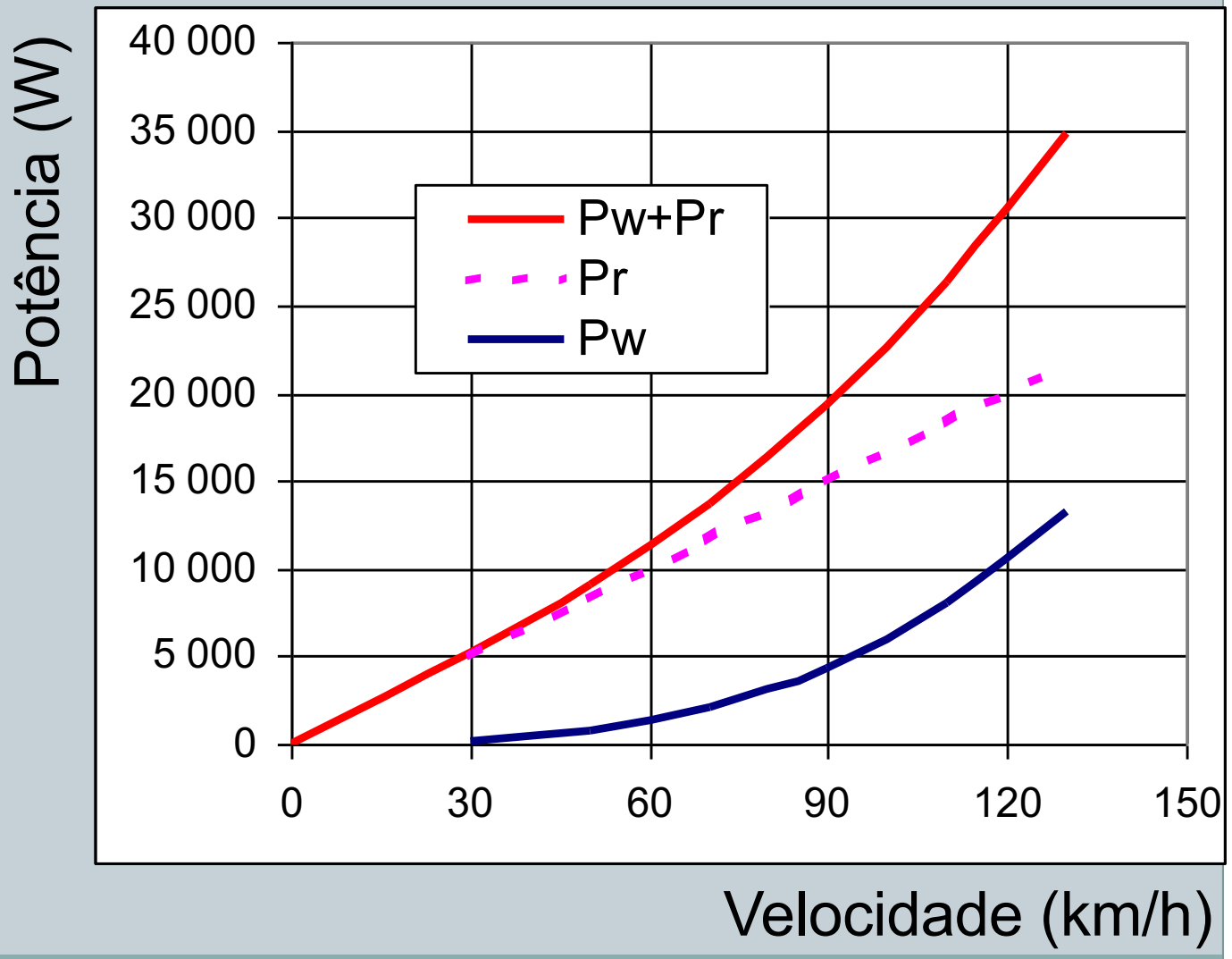
$Fa = m\ a$

m = 2000kg

kr = 0,03

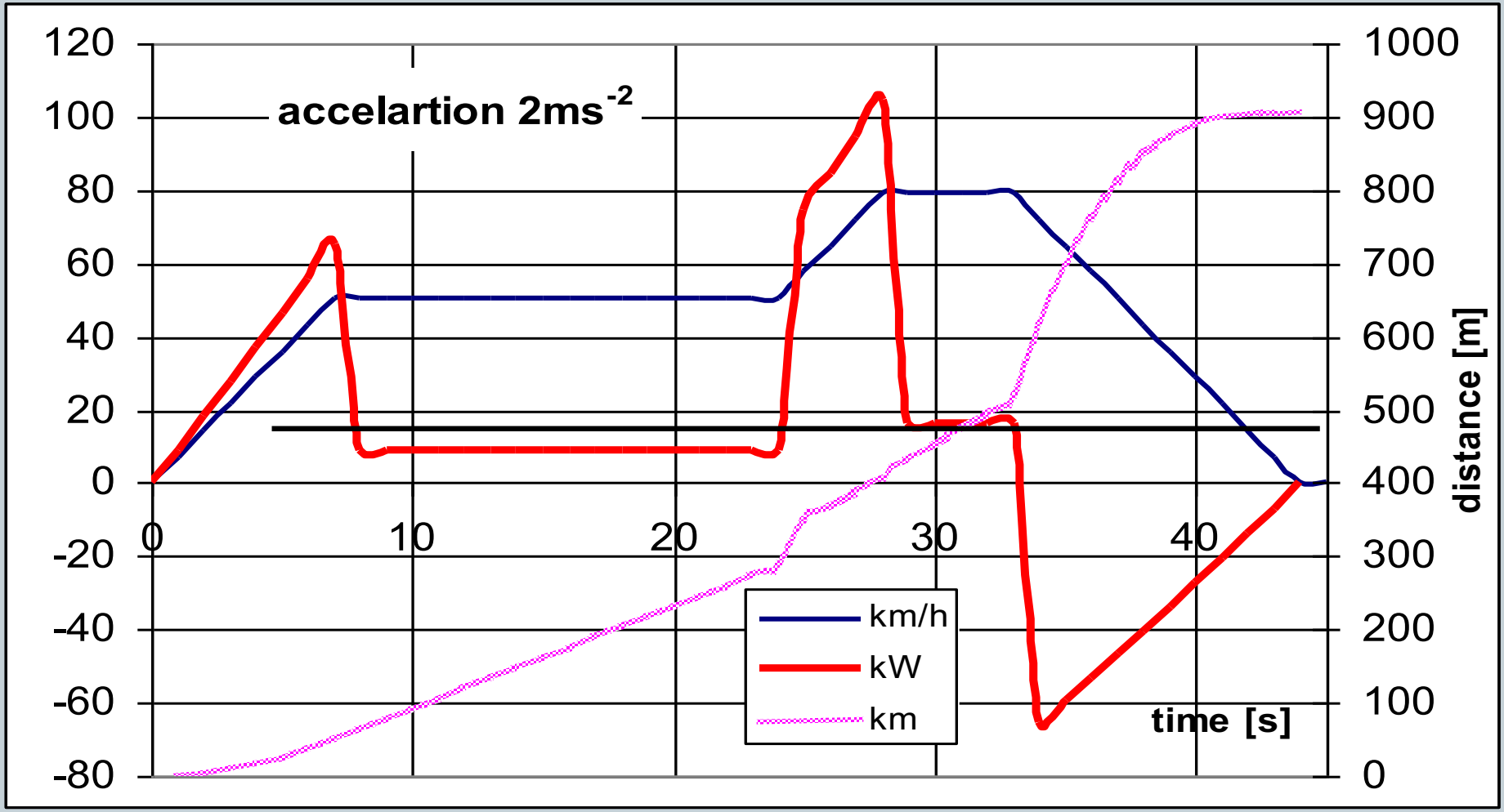
$Sx = 1,6 m^2$

Cx = 0,29



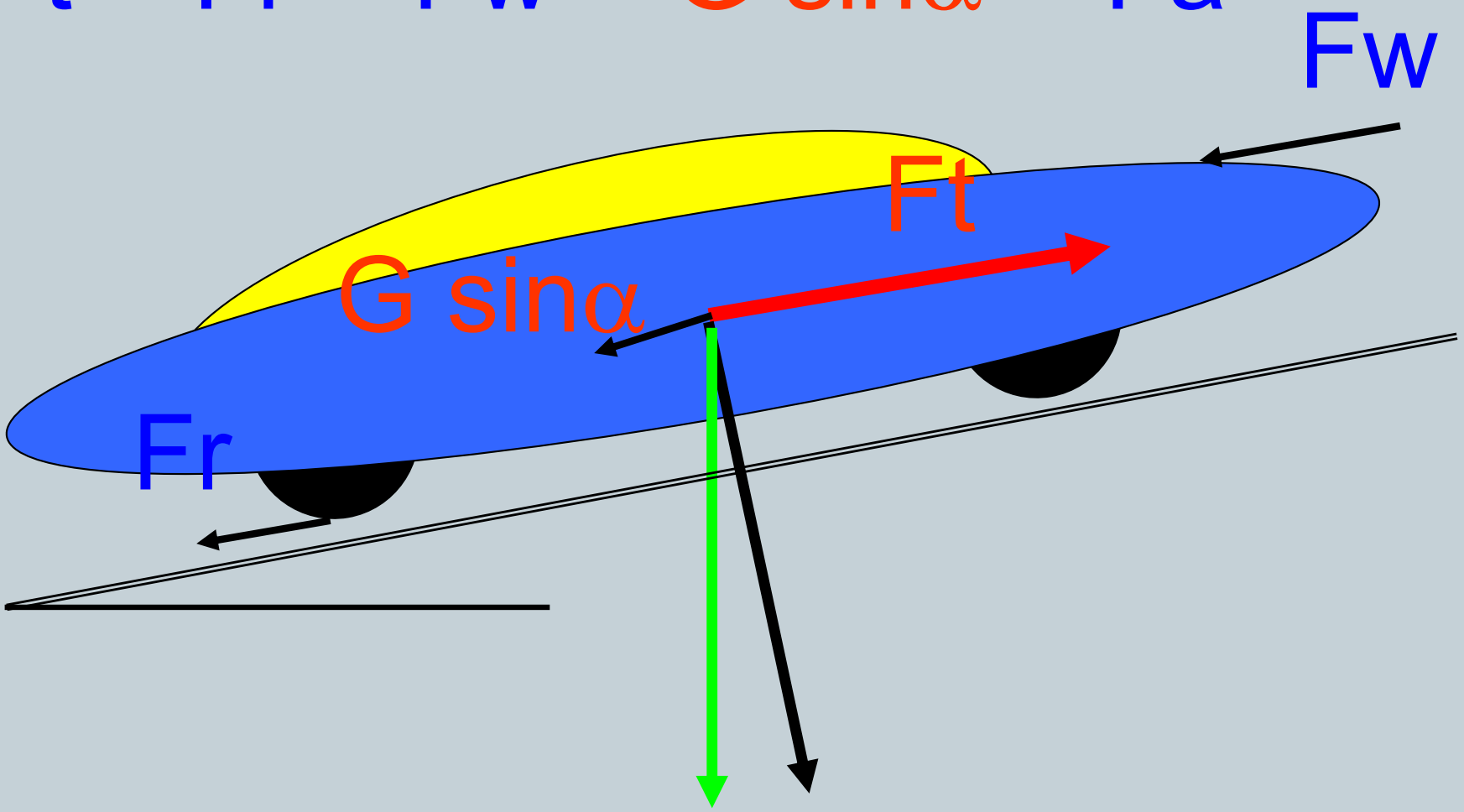
Dinâmica do veículo (Ciclo citadino)

Energia cinética $E_k = ½ m v^2$

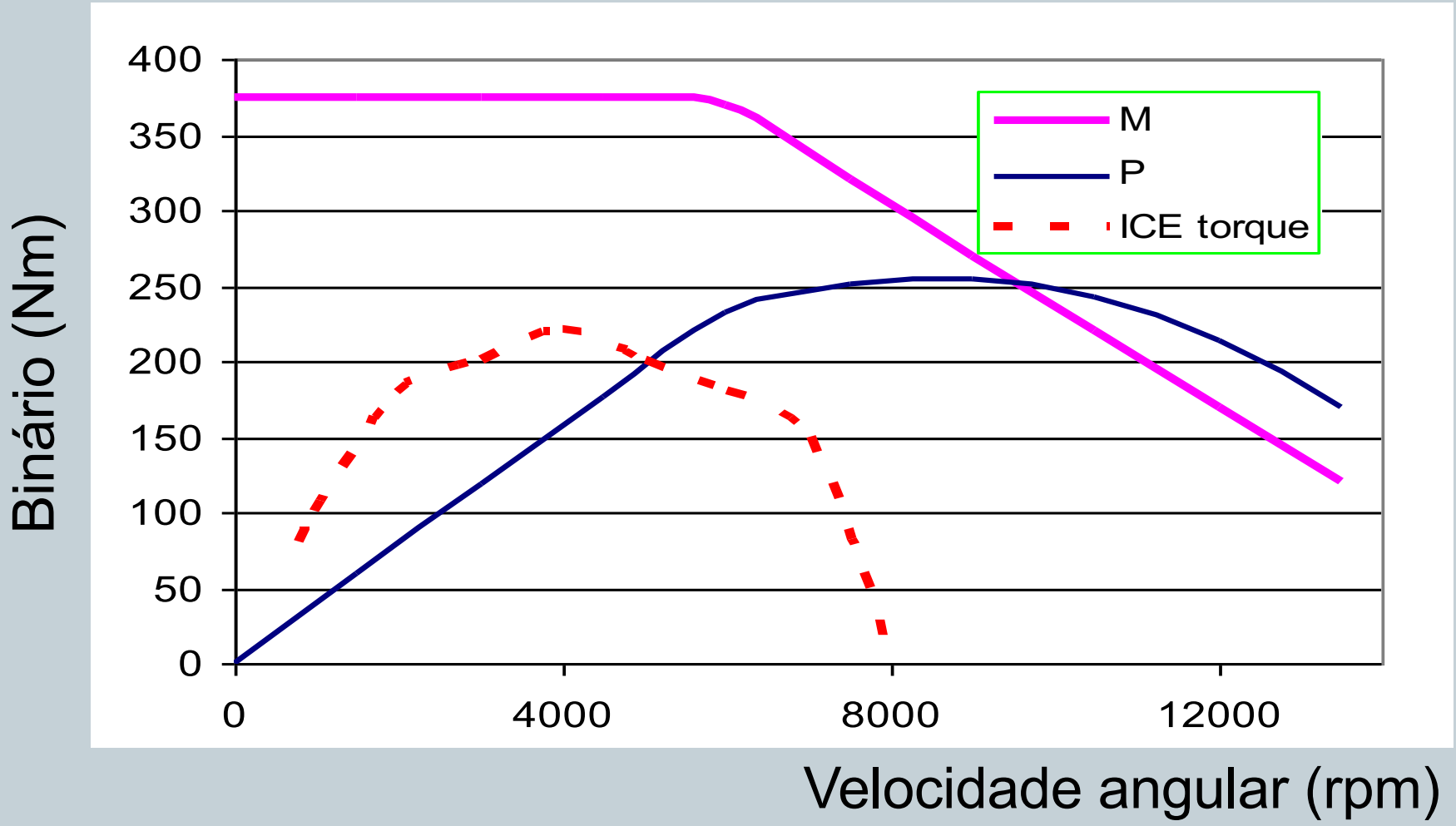


Balanço dinâmico de forças simplificado (subida)

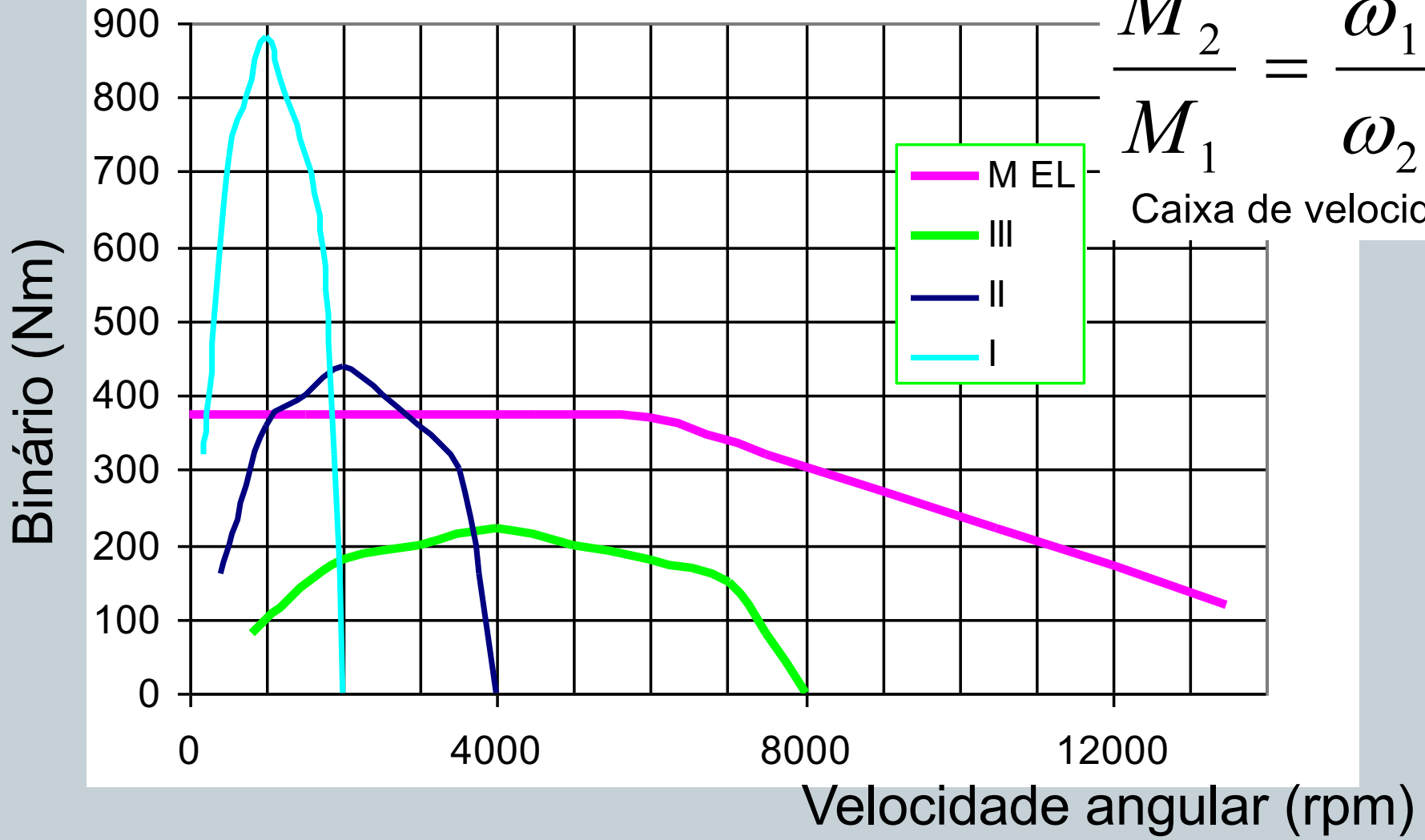
$$Ft = Fr + Fw + G \sin\alpha + Fa$$



Motor de combustão interna versus motor eléctrico



Motor de combustão interna versus motor eléctrico (Tesla)



$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{\omega_1}{\omega_2}\eta_{12}$$

Caixa de velocidades

Motor de combustão interna versus motor eléctrico

Desvantagens dos veículos equipados com motor de combustão interna:

- Vibração
- Cheiro
- Ruído

Motor de combustão interna versus motor eléctrico

Desvantagens dos veículos eléctricos:

bateria automóvel	
tensão [V]	12
capacidade [Ah]	70
Energia [Wh]	840
Energia [KJ]	3024

gasolina	
volume [l]	1
massa [kg]	0,72
Energia [Wh]	8960
Energia [KJ]	32255

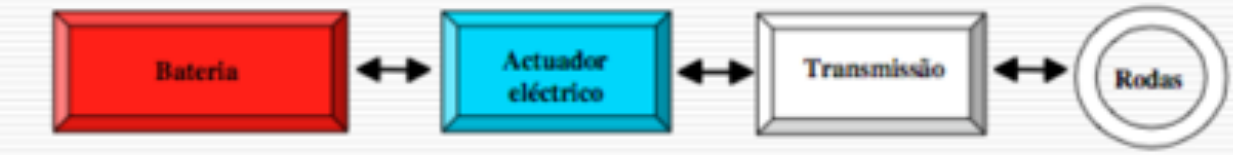
10,3 baterias

Motor de combustão interna versus motor eléctrico

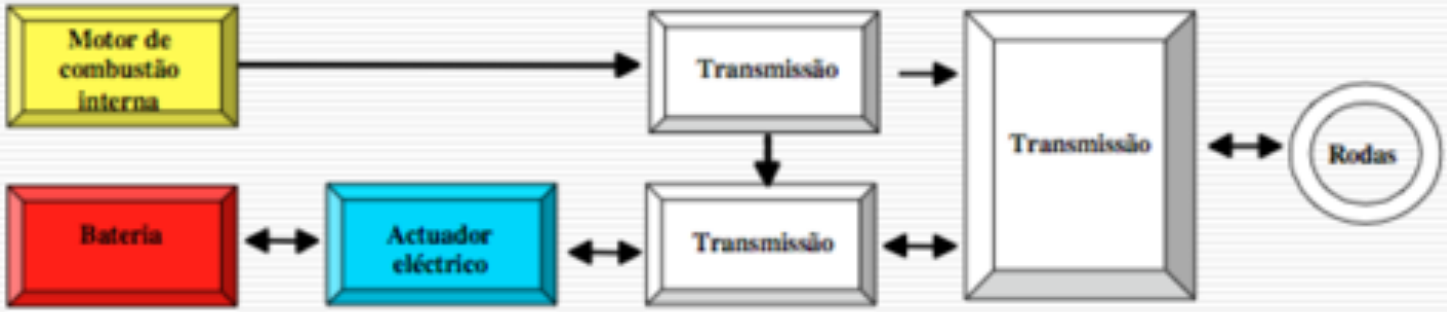
Causas para o declínio dos veículos eléctricos nos Estados Unidos da América:

- Melhoria da rede viária (1920) o que obriga a percorrer maiores distâncias
- Descoberta de petróleo no Texas
- Invenção do motor de arranque eléctrico (1912)
- Produção em série de veiculos com mortor de combustão (Henry Ford). Passaram a custar medade do preço de um VE…

Tipos de veículos eléctricos



- veículos eléctricos alimentados a partir de baterias



- veículos com sistemas híbridos



- sistemas baseados em pilhas de combustível

Veículos eléctricos e híbridos



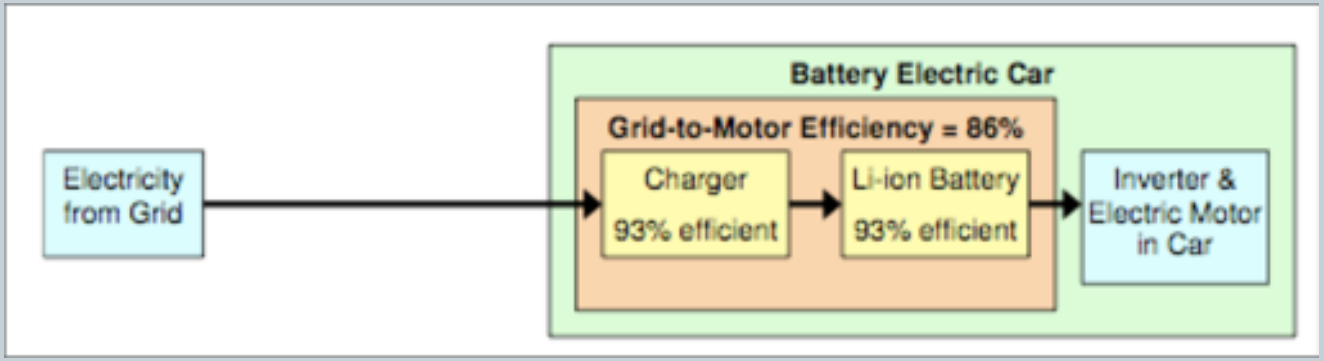




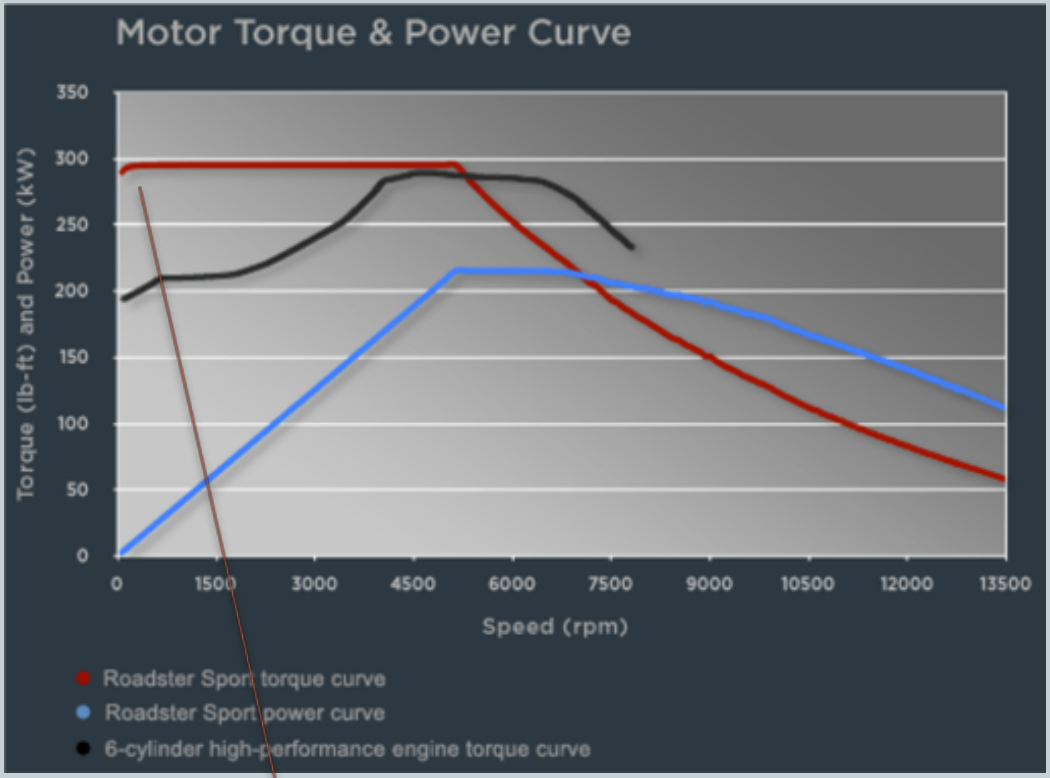
Veículos eléctricos e híbridos







Veículos eléctricos e híbridos

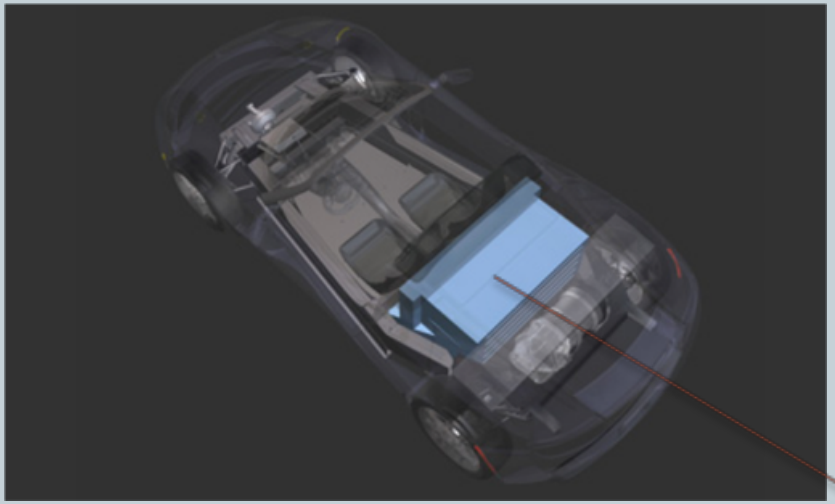


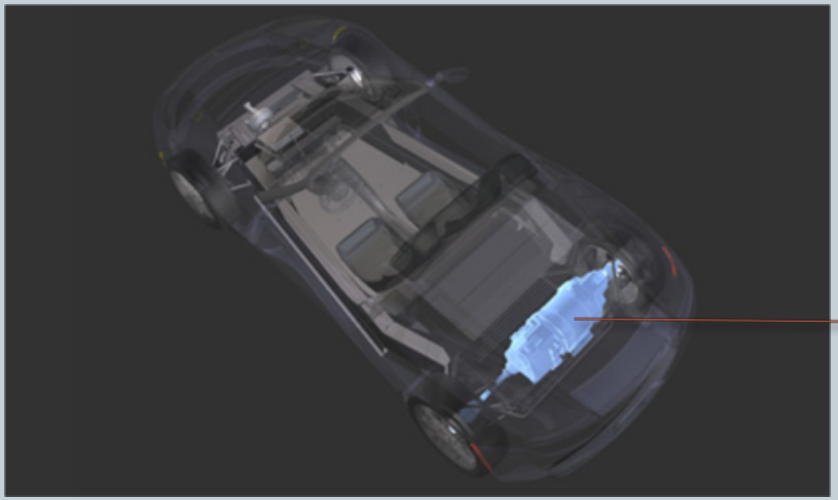
Binário máximo disponível no arranque



Tesla Roadster
100% electric
0-100 km/h em 3,9 seg
380 km de autonomia
288 Cv / 14000 rpm
Peso: 1238kg

Veículos eléctricos e híbridos



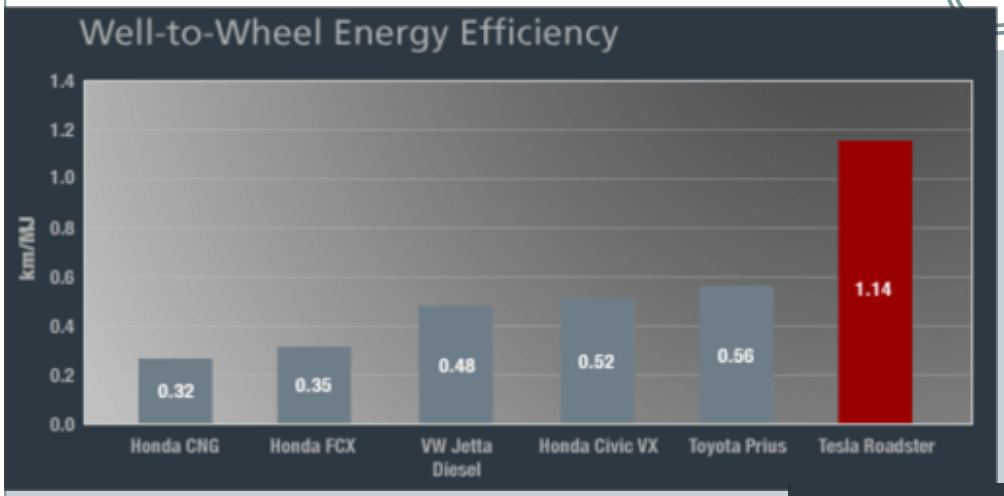




Baterias

Motor

Veículos eléctricos e híbridos





Fuel Efficiency by Type

Example Car	Technology	Source Fuel	Well-to-Station Efficiency	Vehicle Mileage	Vehicle Efficiency	Well-to-Wheel Efficiency
Tesla Roadster	Electric	Natural Gas	52.5%	110 Wh/km	2.18 km/MJ	1.14 km/MJ
Toyota Prius	Hybrid (Gas/Electric)	Crude Oil	81.7%	55 mpg	0.68 km/MJ	0.556 km/MJ
Honda Civic VX	Gasoline Engine	Crude Oil	81.7%	51 mpg	0.63 km/MJ	0.515 km/MJ
VW Jetta Diesel	Diesel Engine	Crude Oil	90.1%	50 mpg	0.53 km/MJ	0.478 km/MJ
Honda FCX	Hydrogen Fuel Cell	Natural Gas	61.0%	64 m/kg	0.57 km/MJ	0.348 km/MJ
Honda CNG	Natural Gas Engine	Natural Gas	86.0%	35 mpg	0.37 km/MJ	0.318 km/MJ

Tracção rodoviária eléctrica e híbrida

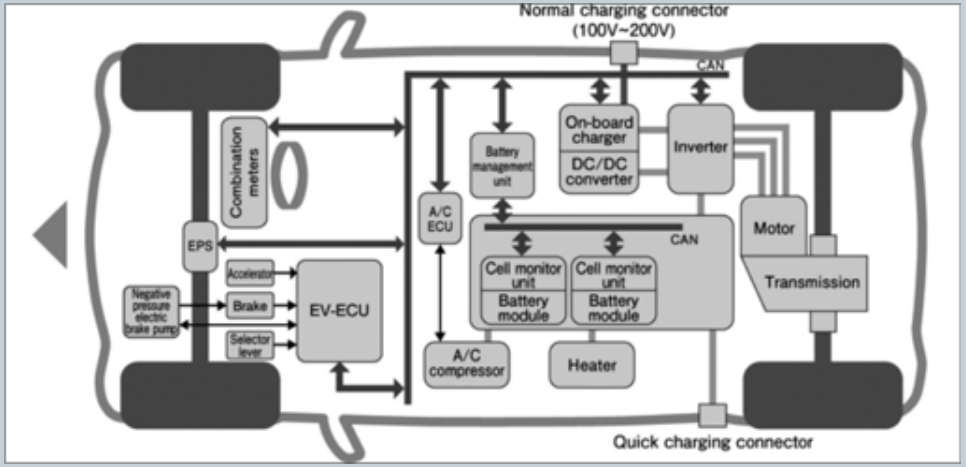


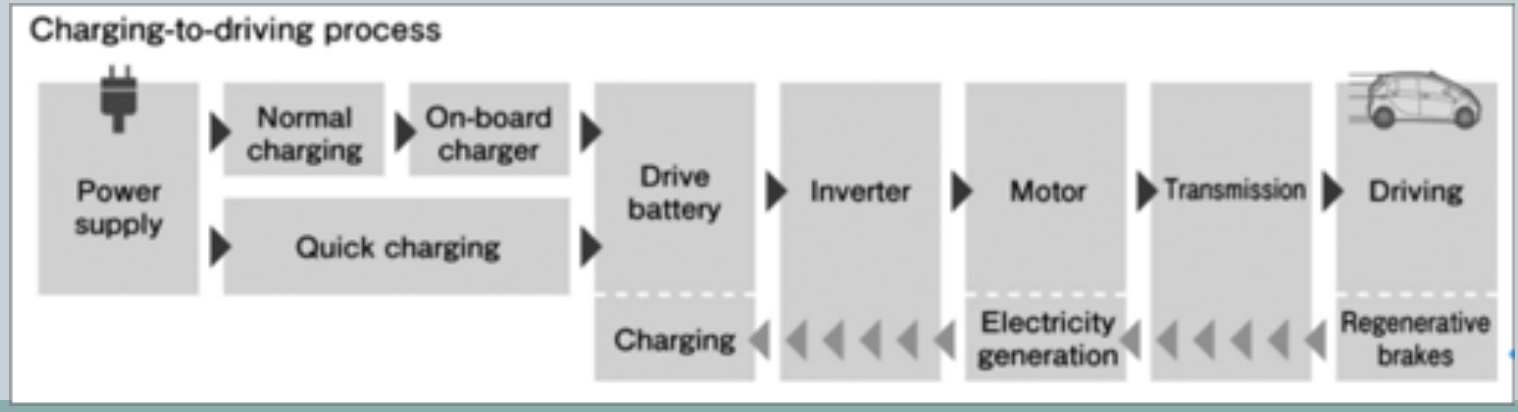
Método de carregamento	Pot. Elec.	Duração
Normal	200Vac 15A	7h (carga total)
	100Vac 15A	14h (carga total)
Rápido	200V (trif.) 50kW	30min (80% da carga)

- 88 baterias de iões de lítio, em série
- Um único motor de magnetos permanentes (AC)
- Caixa de velocidades com uma única velocidade

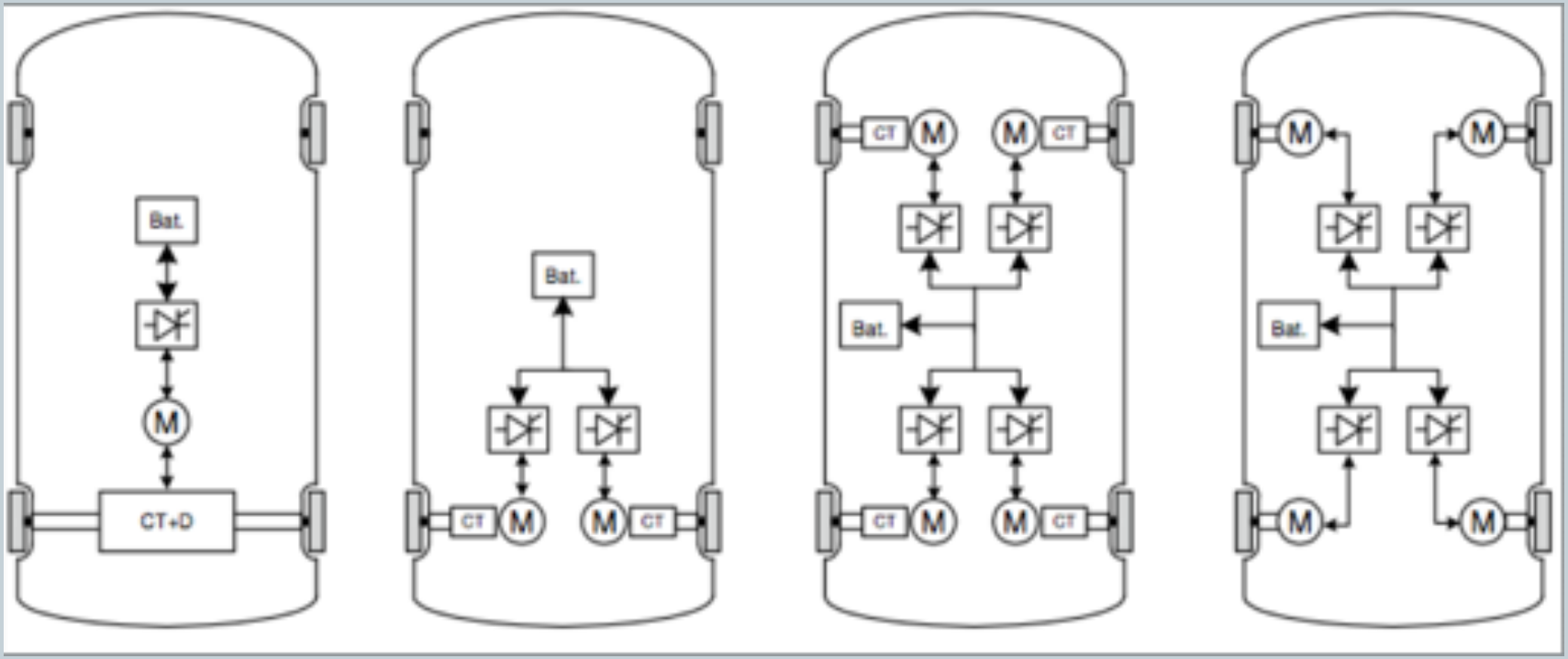
Tracção rodoviária eléctrica e híbrida





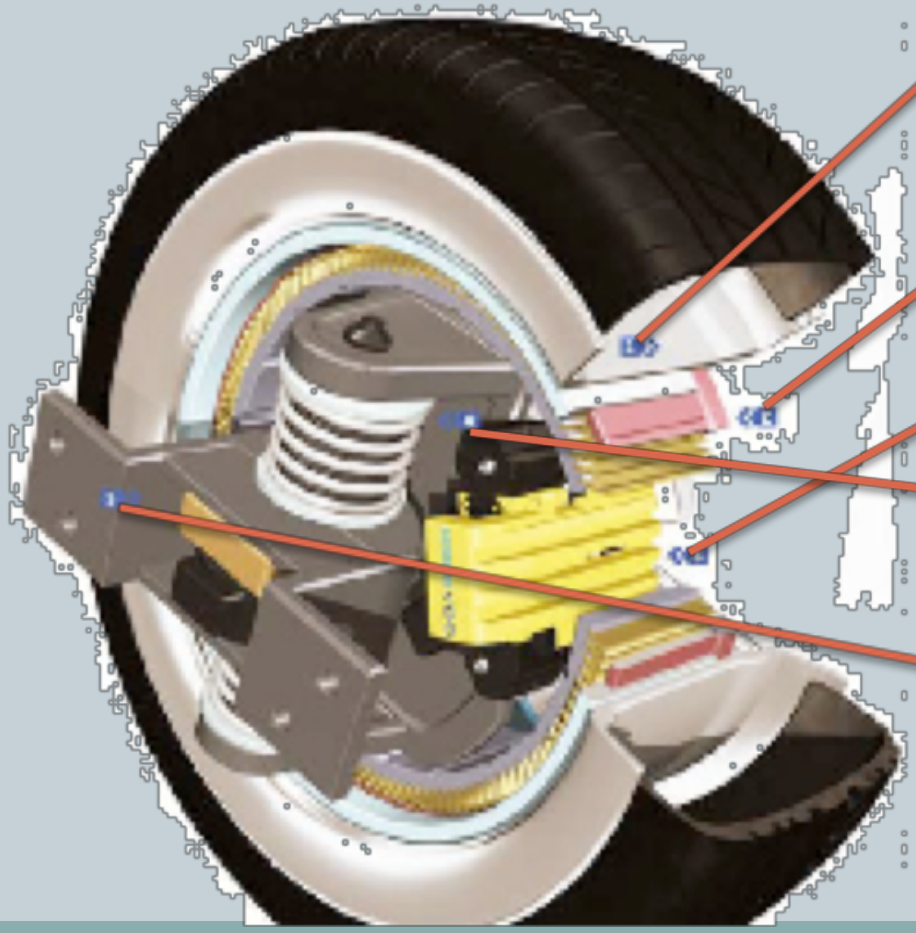


Veículos eléctricos equipados apenas com baterias (possíveis configurações)



- Um motor com caixa de transmissão e dfierencial mecânico
- Dois motores com caixa de transmissão mecânica e diferencial eléctrico
- Quatro motores com caixas de transmissão mecânicas
- Quatro motores sem caixa de transmissão e diferencial eléctrico

Veículos eléctricos equipados apenas com baterias



- Pneu com sensores de pressão
- Motor eléctrico
- Travões de disco eléctricos
- Suspensão activa
- Direcção eléctrica

Veículos eléctricos equipados apenas com baterias



Mitsubishi In-wheel motor Electric Vehicle



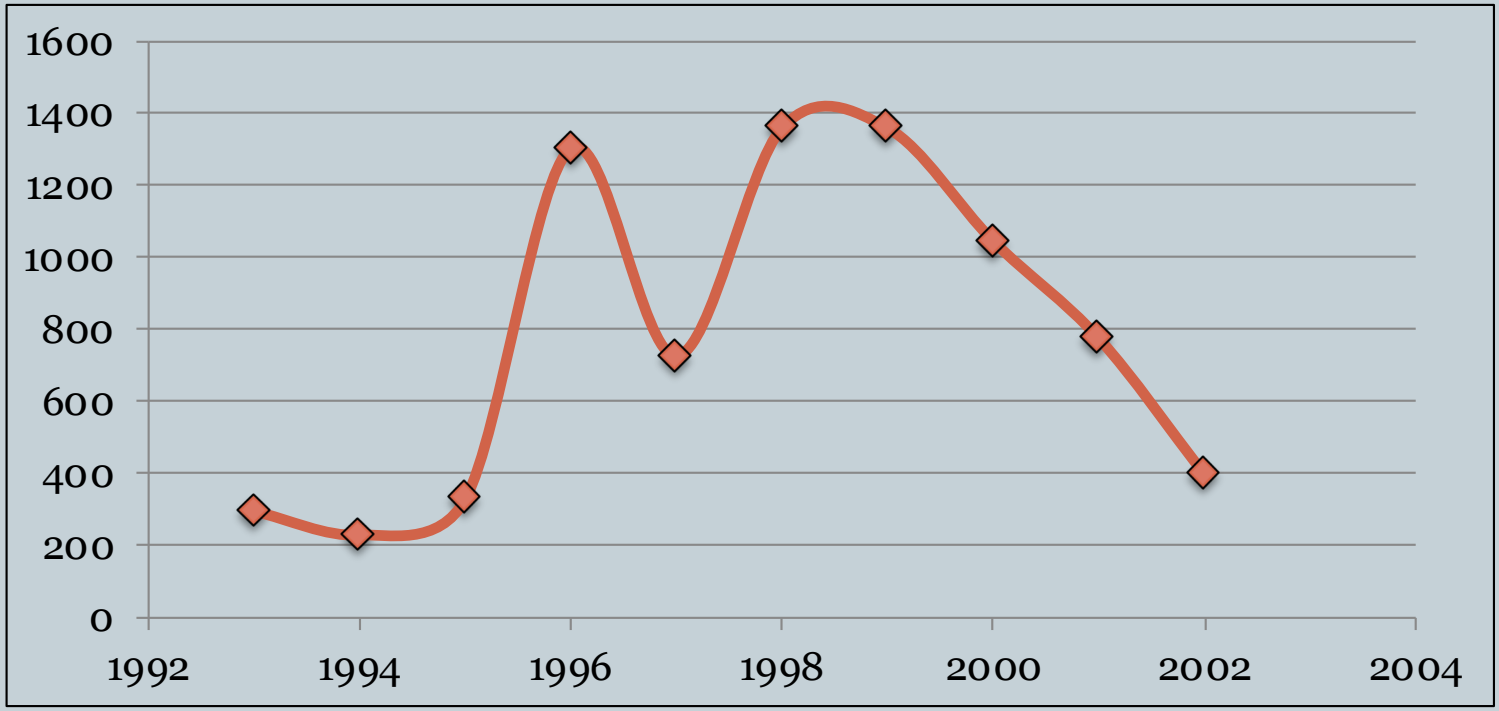
Mitsubishi In-wheel motor Electric Vehicle

Veículos eléctricos equipados apenas com baterias

- Autonomia reduzida (apenas com interesse em circulações zero-emissões)
- Custo elevado acrescido de custo elevado das baterias (apenas com interesse numa utilzação diária intensiva)
- Necessário apoio estatal (tal como nas energias renováveis)
- Aplicabilidade em distribuições logísticas urbanas
- Troca de baterias poderia aumentar a sua autonomia

Veículos eléctricos equipados apenas com baterias

Evolução dos veículos eléctricos novos matriculados em França



Veículos eléctricos híbridos – Motor de combustão interna + acumulador de energia eléctrica

Venda de veículos híbridos Toyota (incluindo a Lexus)

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	Jan/Mai 2007	Total
Japão	0,3	17,7	15,3	12,5	18,5	20	27,2	68,7	58,5	72,4	33,5	344,6
M. Externo	0	0	0	6,5	18,5	21,4	26,1	66	176,4	240,1	147,5	702,4
Total	0,3	17,7	15,3	19	37	41,4	53,3	134,7	234,9	312,5	181	1047

Antes do problema americano (Prius) a Toyota tinha admitido que, no futuro, todos os seus automóveis possam ser híbridos.

Veículos eléctricos híbridos – Motor de combustão interna + acumulador de energia eléctrica

Um **veículo eléctrico híbrido** (HEV) caracteriza-se por possuir mais do que uma fonte de energia de propulsão, sendo a energia eléctrica, no mínimo, uma destas fontes.

Verificam-se principalmente as seguintes combinações, no entanto formalizou-se o conceito de veículo híbrido como sendo a combinação do motor eléctrico e motor de combustão interna.

Motor a gasolina de combustão interna – Bateria
Motor diesel de combustão interna – Bateria
Bateria – Célula de Combustível
Bateria – Condensadores

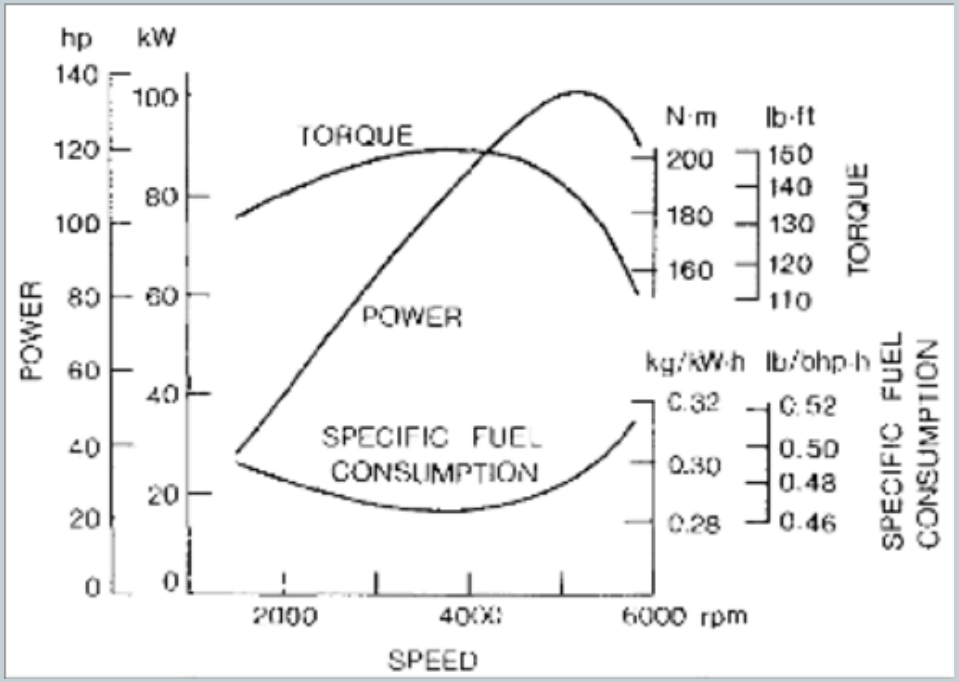
A nível de funcionamento, os veículos eléctricos híbridos utilizam apenas o motor eléctrico, sempre que a potência deste é suficiente para satisfazer as condições de condução e do terreno. Quando a potência do motor eléctrico for insuficiente, recorre-se então ao motor de combustão interna.

Veículos eléctricos híbridos – Motor de combustão interna + acumulador de energia eléctrica

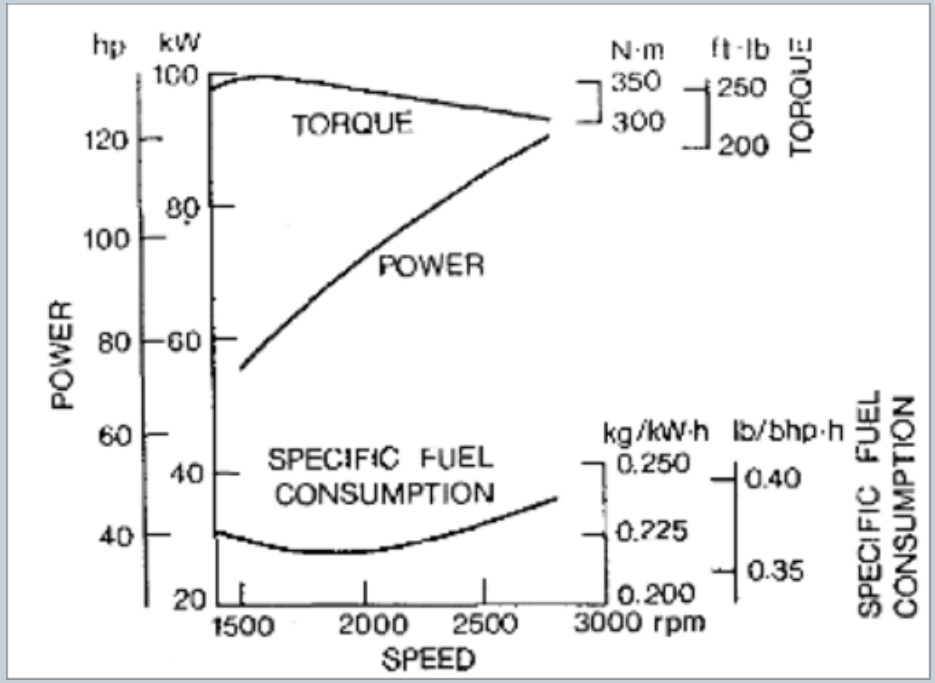
Vantagens dos veículos eléctricos híbridos:

- Travagem regenerativa
- Melhor aproveitamento do motor de combustão
- Funcionamento puramente eléctrico em circuitos urbanos
- Utilização do motor de combustão em percursos não urbanos, com regime optimizado e emissões reduzidas

Veículos eléctricos híbridos – Motor de combustão interna + acumulador de energia eléctrica

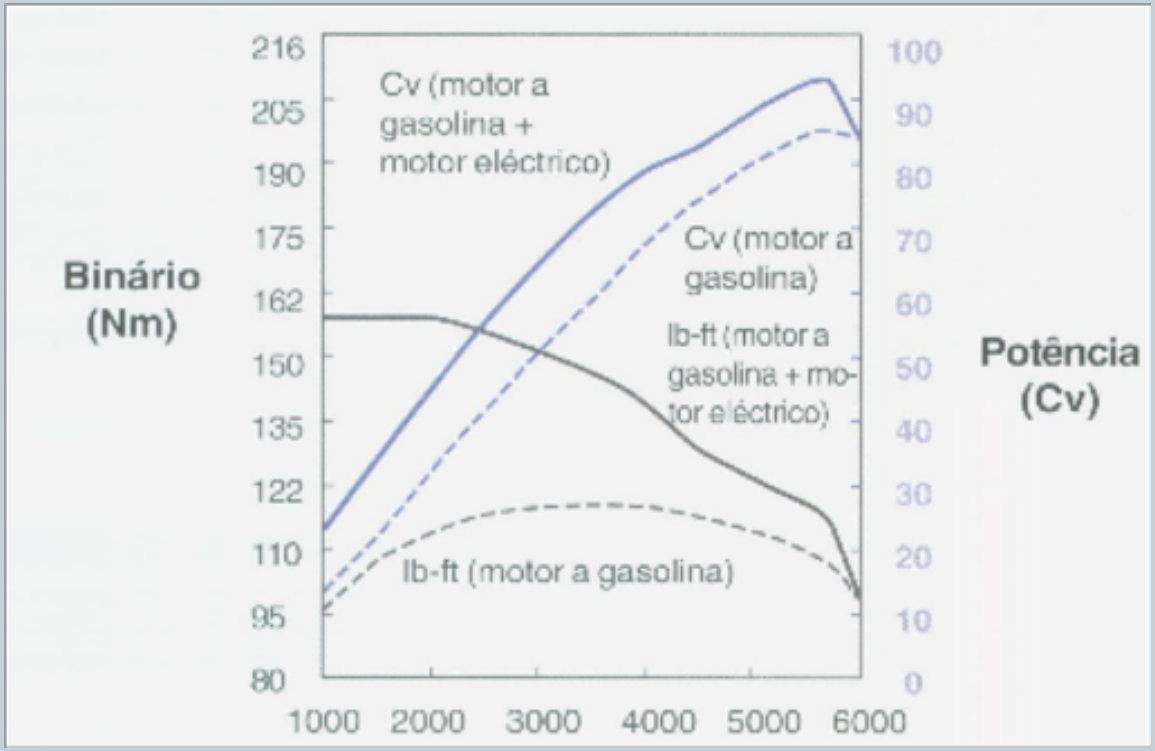


Motor de combustão a gasolina



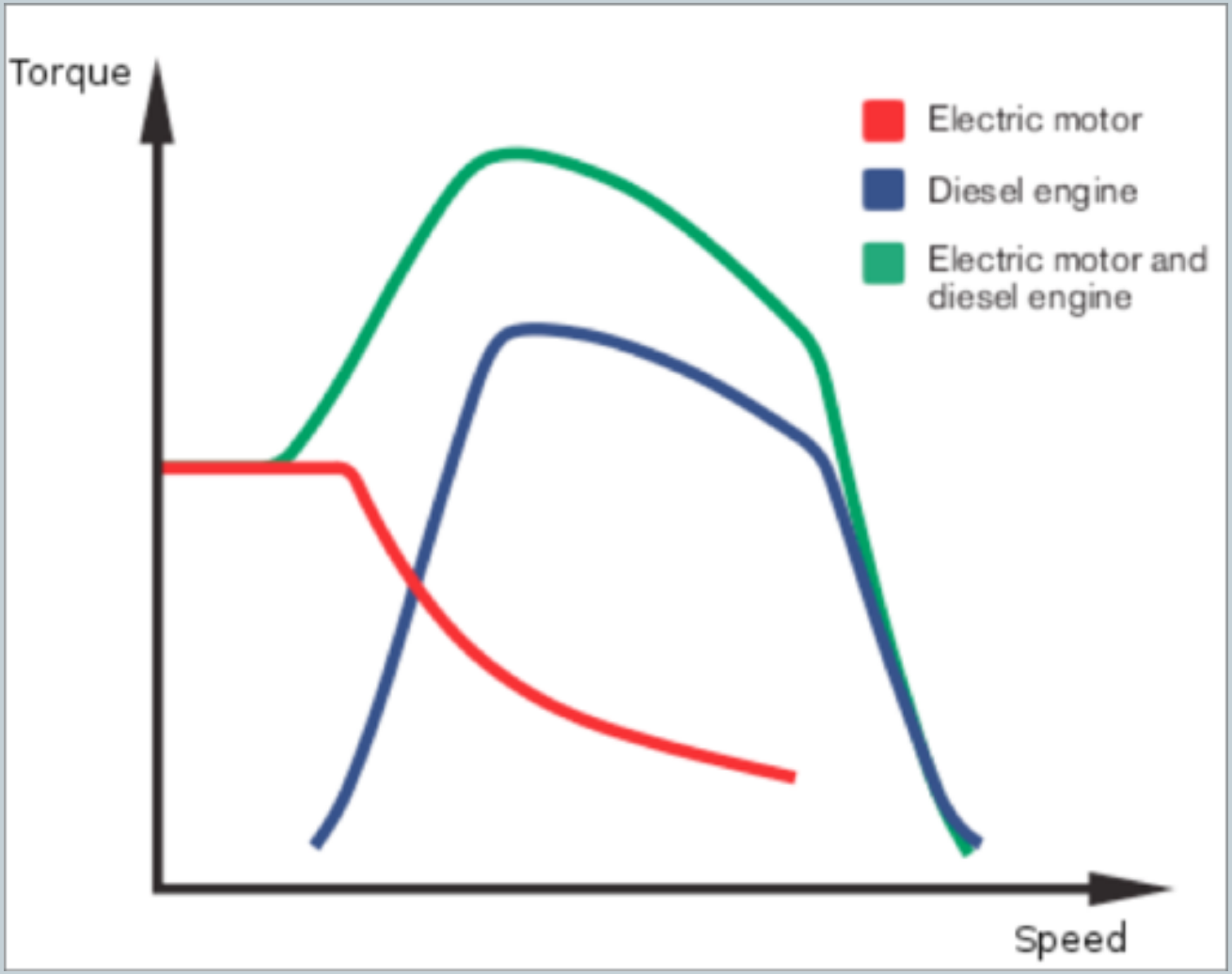
Motor de combustão diesel

Veículos eléctricos híbridos – Motor de combustão interna + acumulador de energia eléctrica

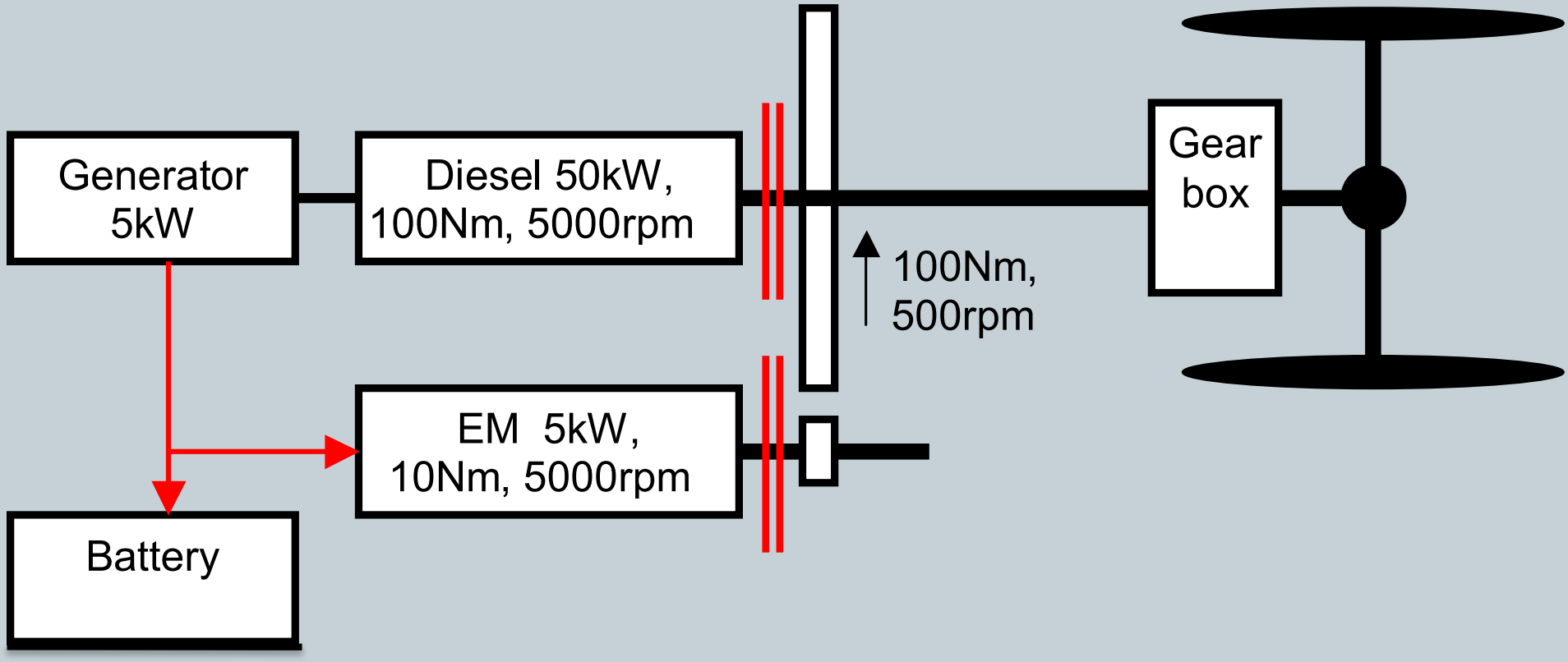


Veículo híbrido – Honda Civic IMA

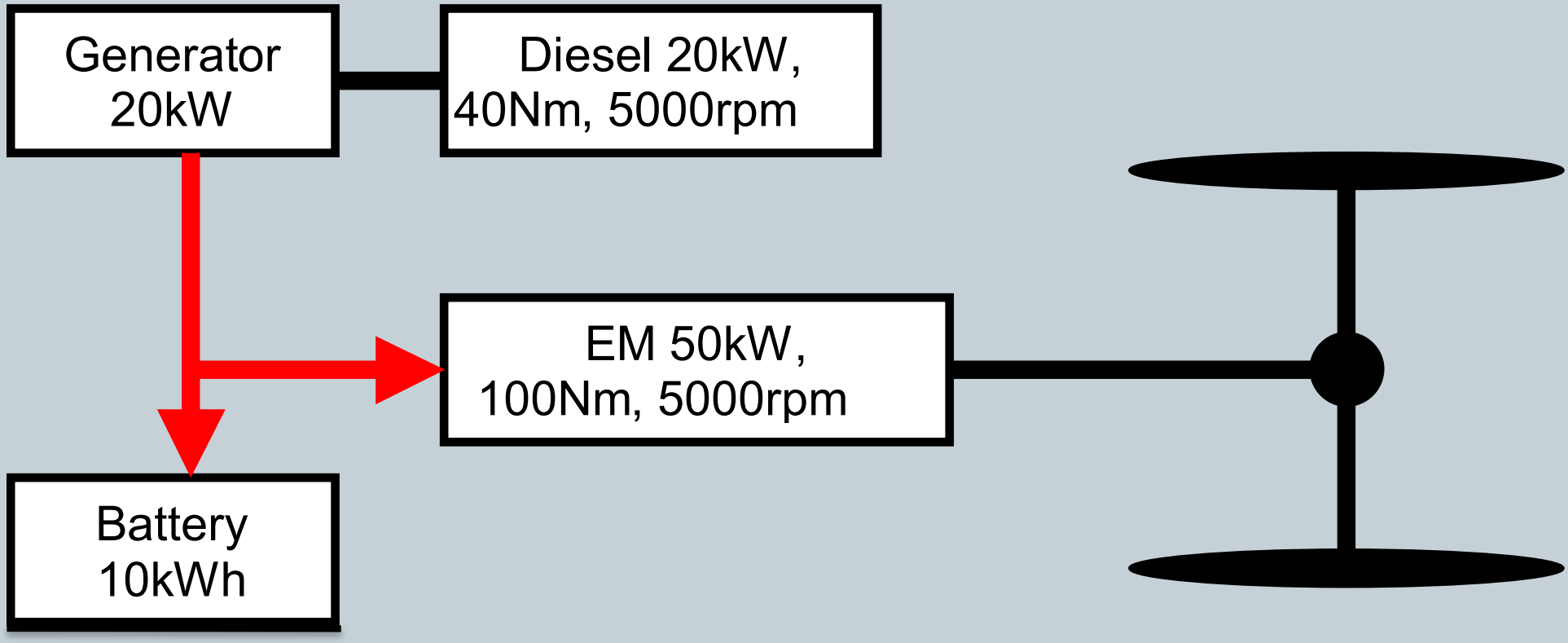
Veículos eléctricos híbridos – Motor de combustão interna + acumulador de energia eléctrica



Veículo híbrido – Paralelo



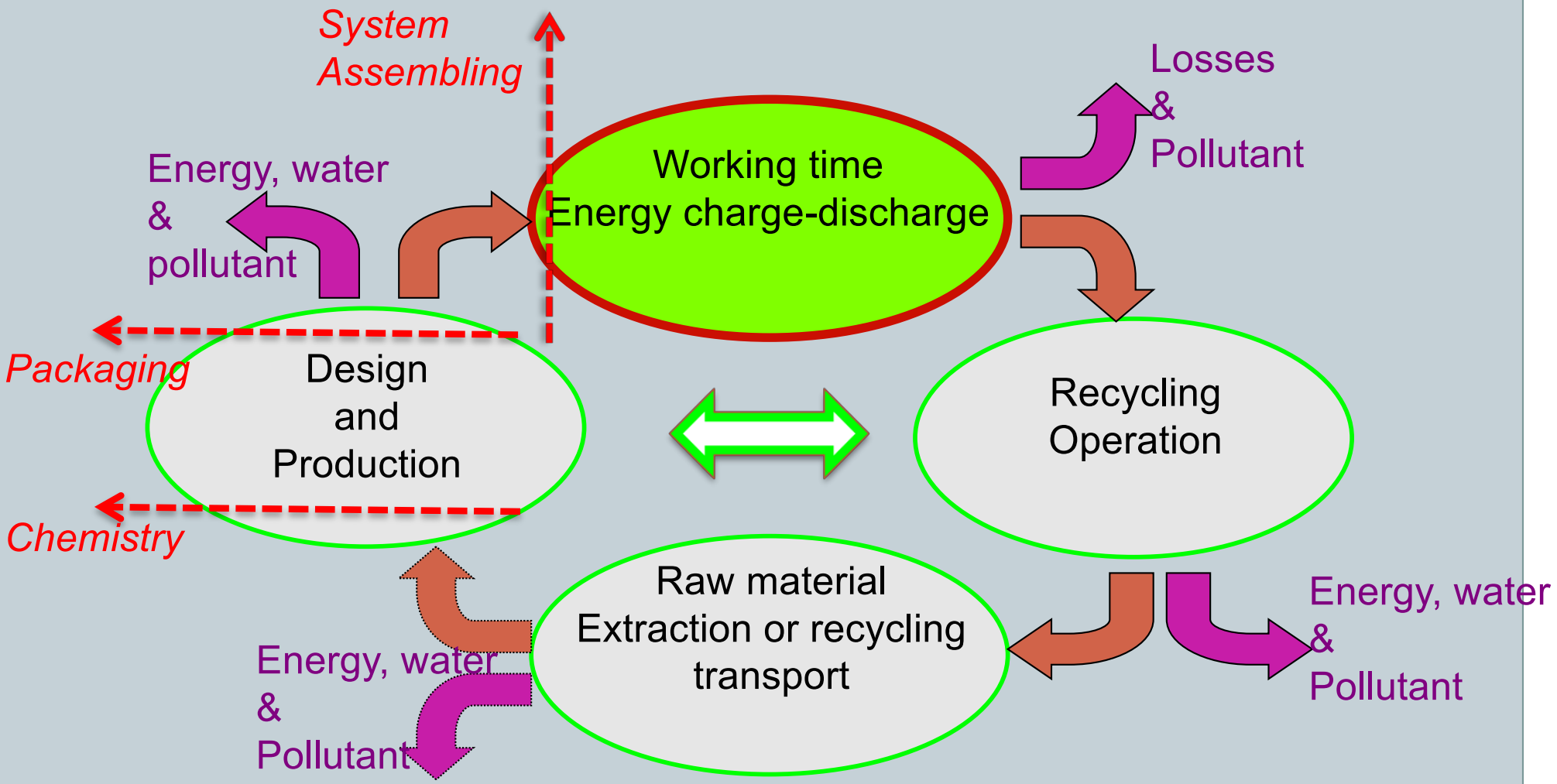
Veículo híbrido – Série



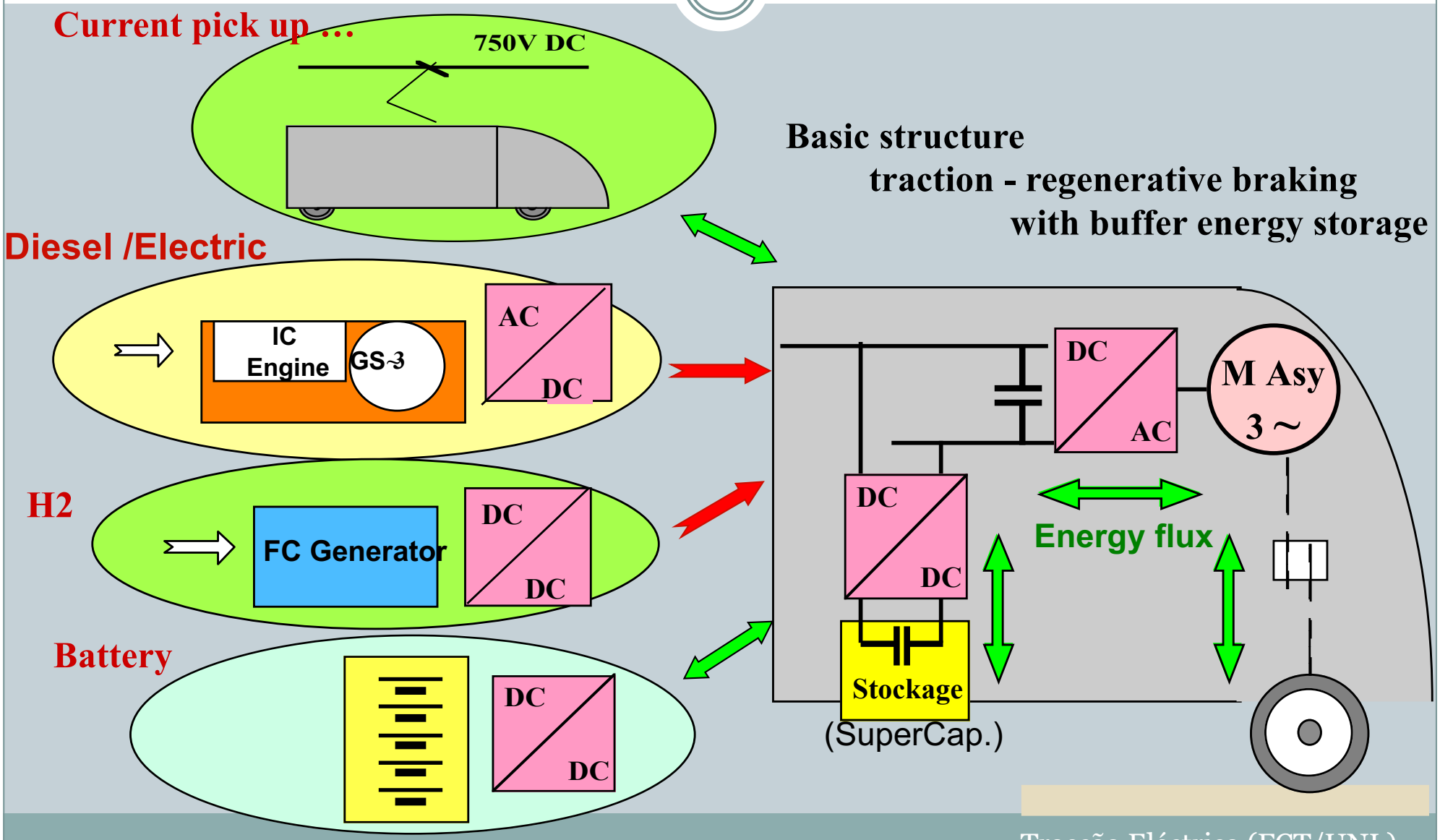
Alguns tipos de veículos eléctricos híbridos produzidos comercialmente

Fabricante	Honda	Toyota	Honda
Nome do modelo	Insight	Prius	Civic
Tipo de Híbrido	Paralelo	Paralelo	Paralelo
ICE	Motor a gasolina VTEC 'Lean Burn'	Motor de ciclo de Atkinson a gasolina VVT	Motor a gasolina VTEC 'Lean Burn'
Capacidade (cm^3) (Motor Combustão Interna)	995	1497	1339
Potência Máxima (kW) (Motor Combustão Interna)	50	57	69
Motor Eléctrico	Motor de Magnetos Permanentes sem escovas	Motor Síncrono de Magnetos Permanentes	Motor de Magnetos Permanentes sem escovas
Potência Máxima (kW) (Motor Eléctrico)	10	50	15
Tipo de Bateria	Hidratos Metálicos de Níquel (NiMH)	Hidratos Metálicos de Níquel (NiMH)	Hidratos Metálicos de Níquel (NiMH)
Tensão (V)	144	201,6	158
Capacidade Energética da Bateria (kWh)	0,94	1,9	0,87
Método de Recarga da Bateria	Energia Regenerativa de Travagem	Energia Regenerativa de Travagem e Motor de Combustão Interna	Energia Regenerativa de Travagem
Transmissão	Transmissão Continuamente Variável (CVT)	Transmissão Continuamente Variável Controlada Electronicamente	Transmissão Continuamente Variável (CVT)
Velocidade Máxima (km/h)	180	170	185
Média de Consumo de Combustível (l/100km)	3,4	4,3	4,6
Preço de venda	$18000 (€ 12240)	$21100 (€ 14350)	$22600 (€ 15370)

Energia sustentável – Processo industrial com análise completa do ciclo de vida de todos os componentes



Arquitectura híbrida
O conceito das várias fontes de energia



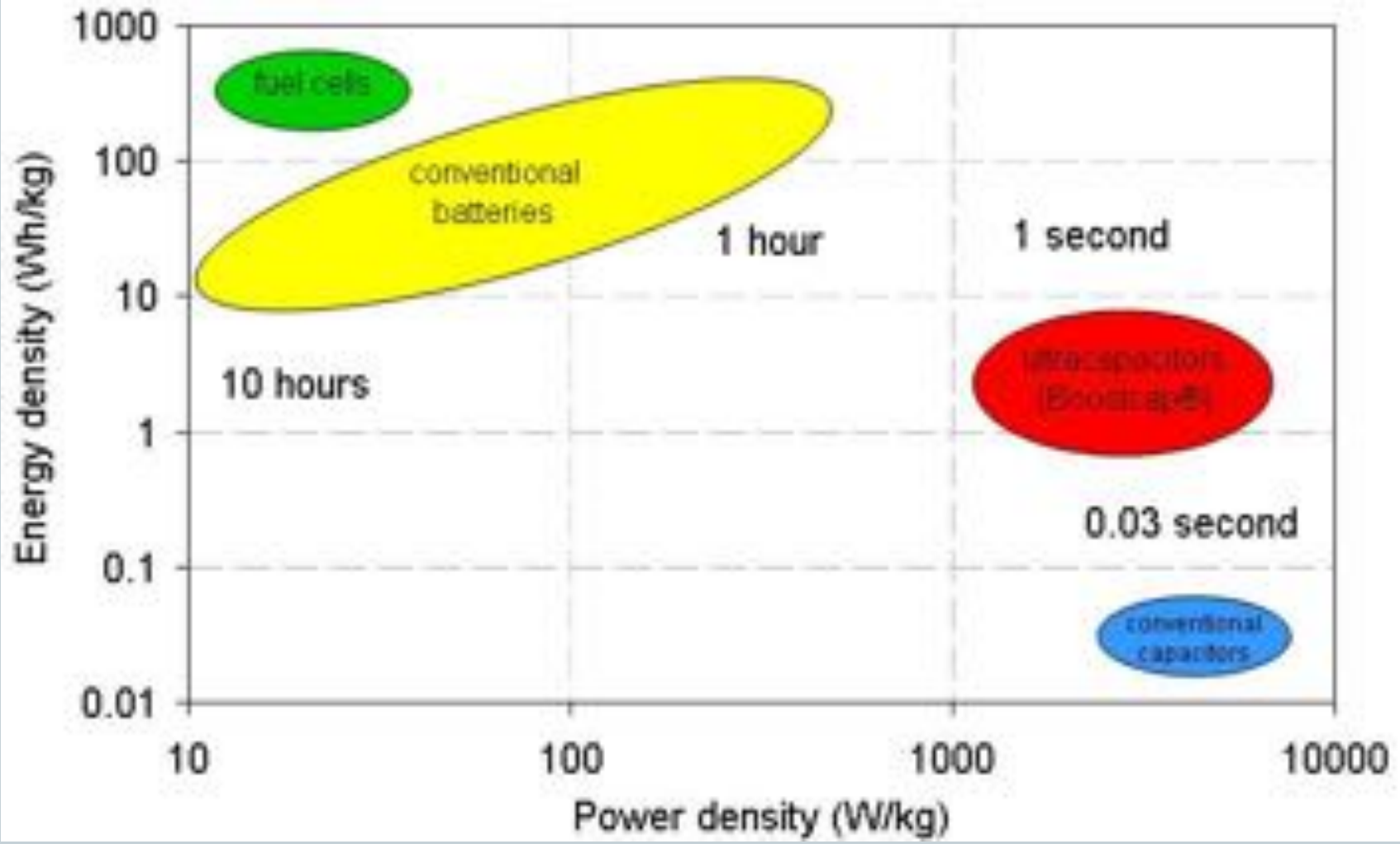
Bateria como acumulador de energia

Battery System	Recharging Time [h]	Fast charging	Overcharging	Efficiency Ah %
Lead acid	6-8 (16)	1 [h], 90%	Yes, medium	80-90
Nickel/Cadmium	1	15 min, 60%	**Yes, high**	**70-80**
Nickel/Zinc	1	15 min, 60%	Yes, medium	80
Nickel/Metal Hydride	2-4	15 min, 60%	Yes, medium	65-70
Lithium-ion	2-4		**NO**	>95
Al-Air	Mechanical charging	minutes	-	-
Zn-Air	Mechanical charging	minutes	-	-
Sodium/Sulfur	8		yes	?
Sodium/Nickel Chloride	6	1	yes	?

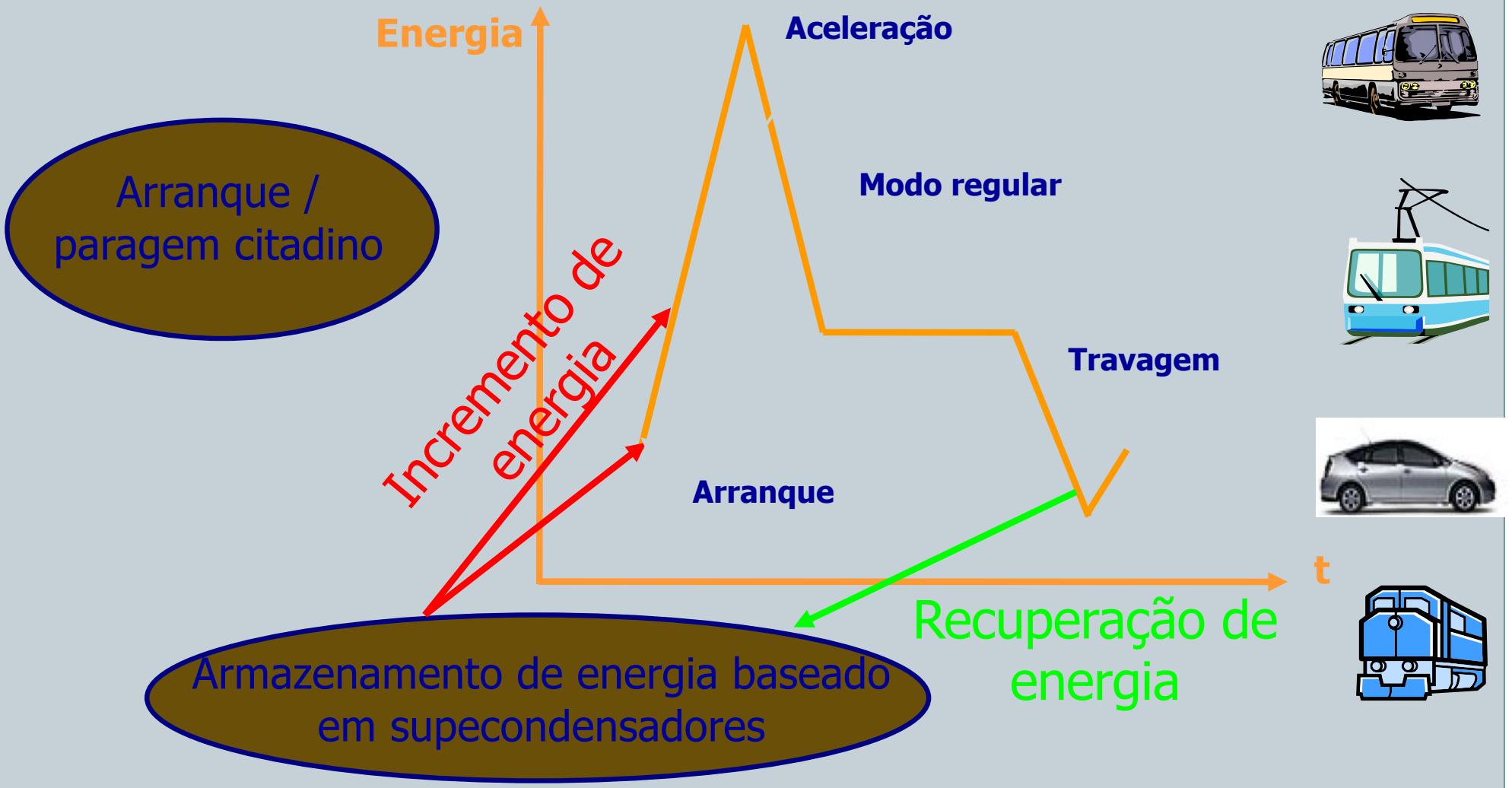
Baterias versus supercondensadores

Characterícitic	SLI battery (starting – lighting – ignition) lead acid, state of the art	Supercapacitor
Charge time	0,5 – 6 h	0,3 – 2 s
Discharge time	10 – 30 minutes	0,3 – 2 s
Cycles	200 – 700	> 500.000
Specific energy (Wh/kg)	25 - 40	1 - 5
Specific power (kW/kg)	0,1 – 0,3	5 – 10

Baterias versus supercondensadores

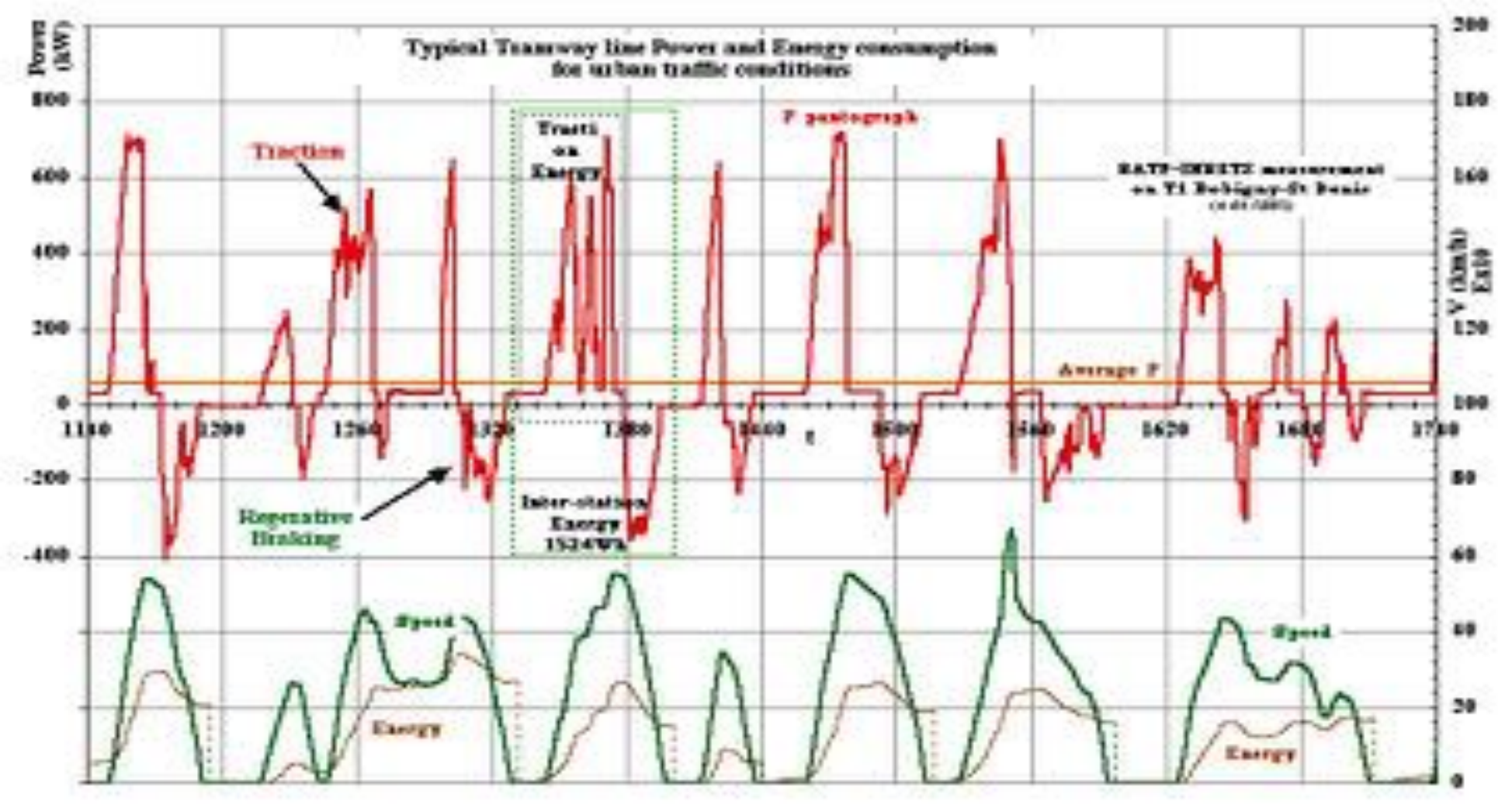


Supercondensadores em transporte

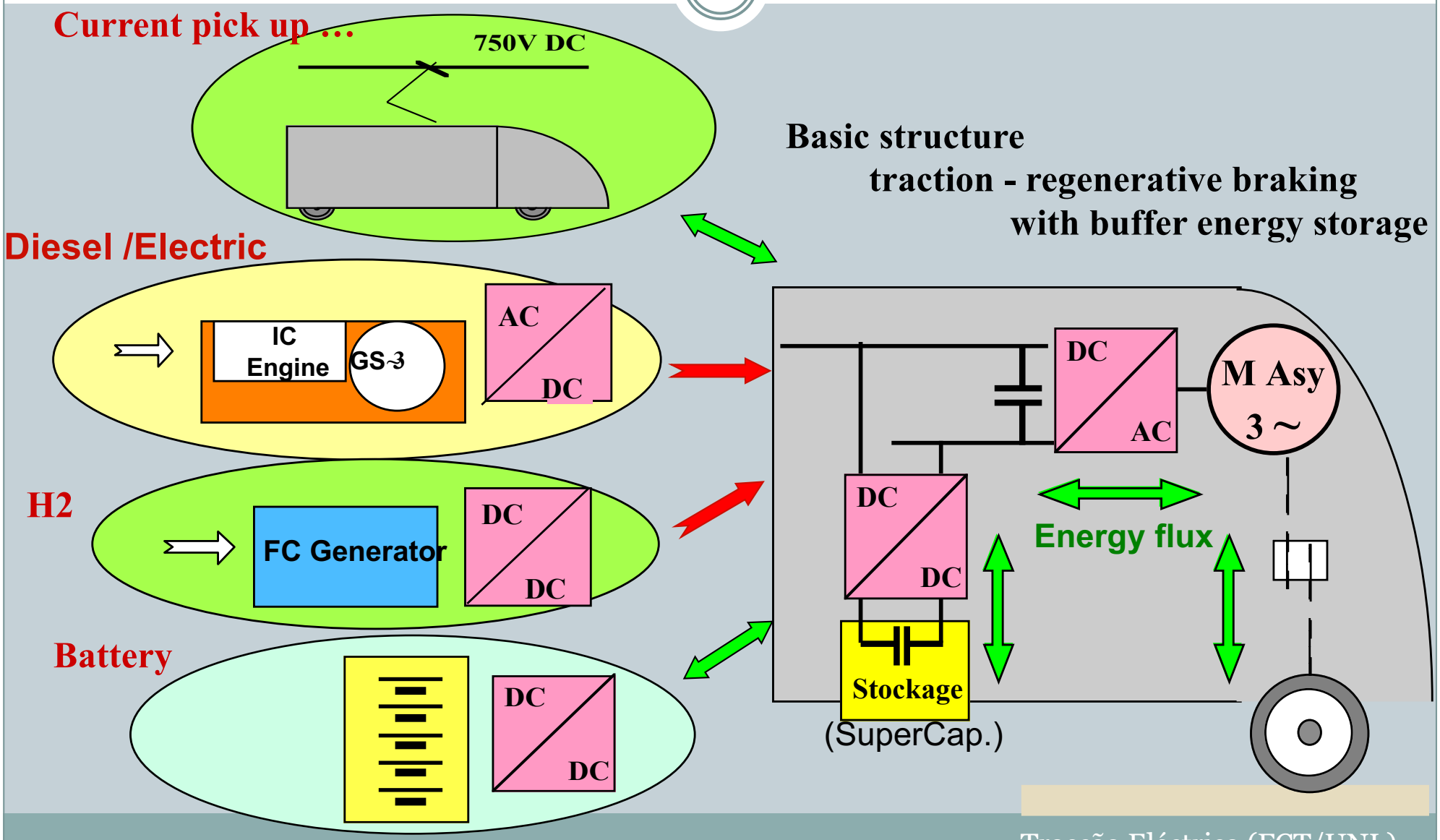


Exemplo de potência absorvida por metro ligeiro

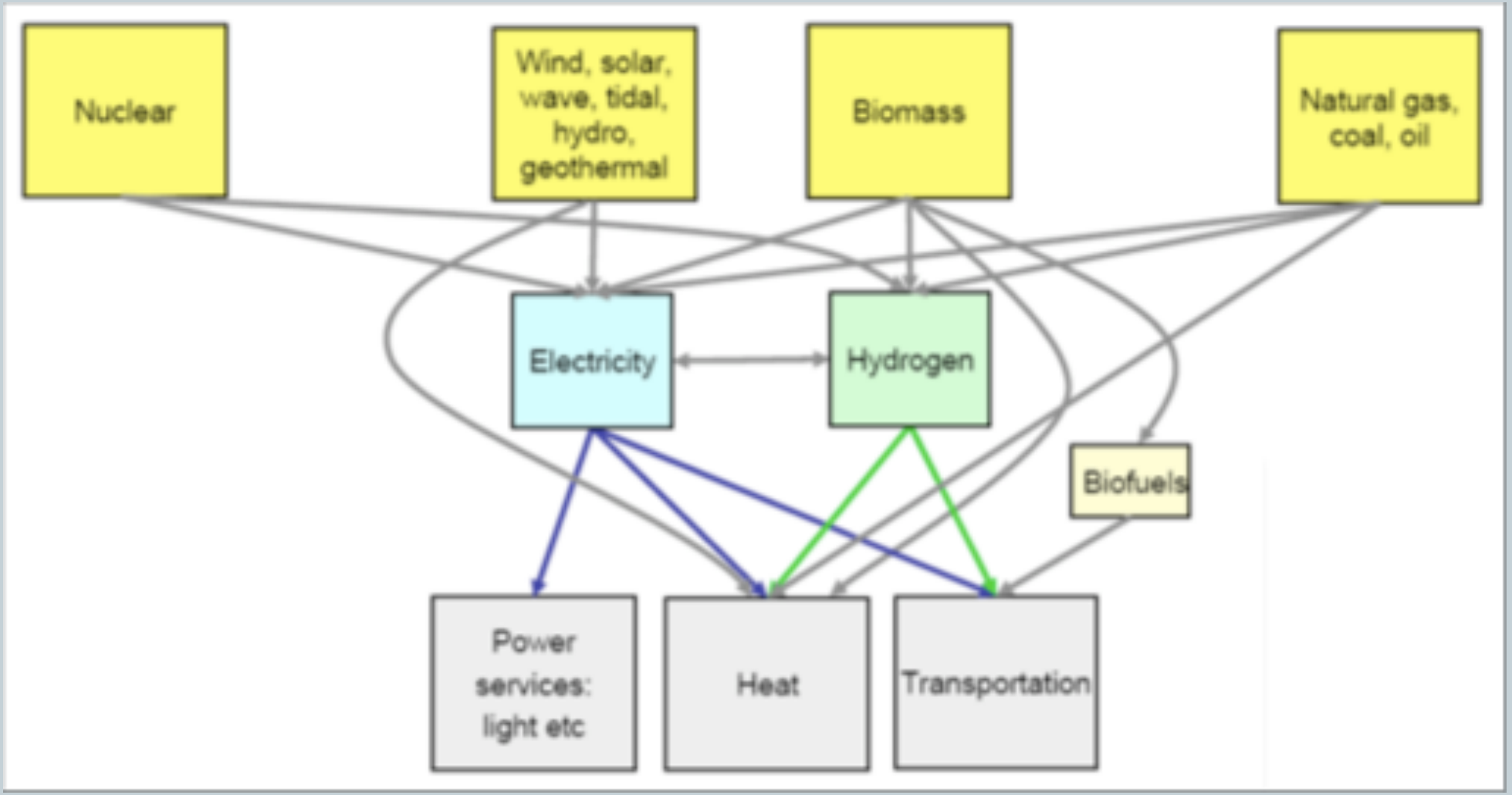
Peak power during starting :750kW - Regenerative power :400kW - Average power :60kW



Arquitectura híbrida
O conceito das várias fontes de energia



O Hidrogénio nos sistemas energéticos

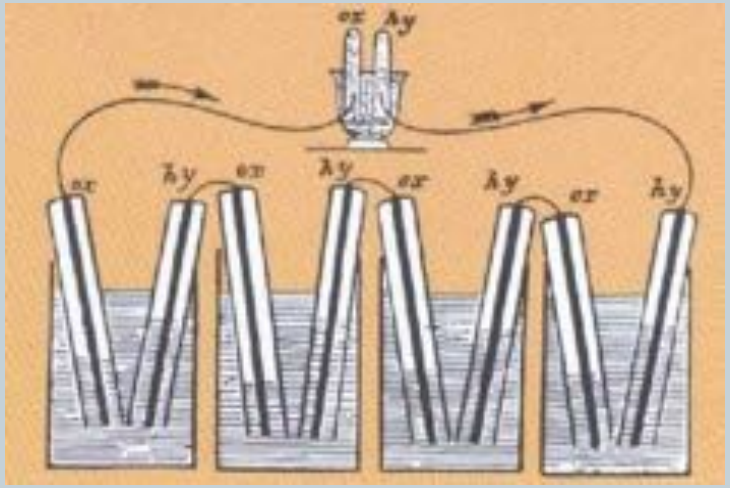


O Hidrogénio nos sistemas energéticos

A Pilha de Combustível não é uma tecnologia recente. A sua descoberta data de 1839 e deve-se a Sir William Grove, jurista que se tornou cientista. Verificou que o processo da electrolise da água em *Hidrogénio e Oxigénio* se podia reverter, isto é a reacção electroquíma destes dois gases dava origem a uma corrente eléctrica – Célula de Grove



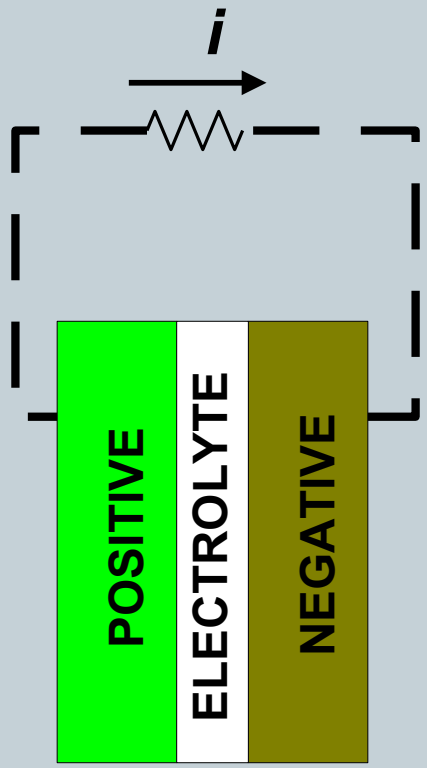
Sir William Grove



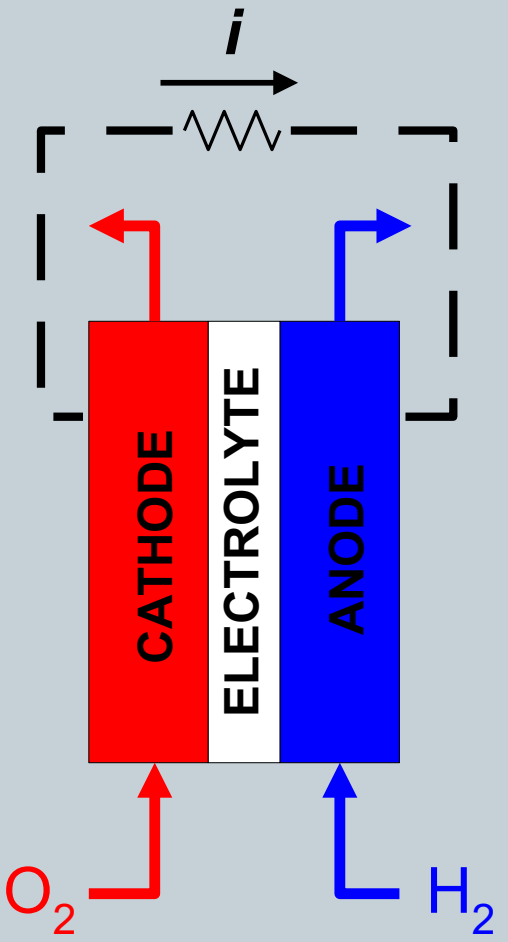
Primeira Célula de Combustível

As correntes debitadas pela célula de Grove eram tão reduzidas que a sua realização não teve grande importância técnica. Grove designou o dispositivo descoberto como sendo uma bateria gasosa – *a primeira célula de combustível.*

Pilha de combustivel versus Bateria

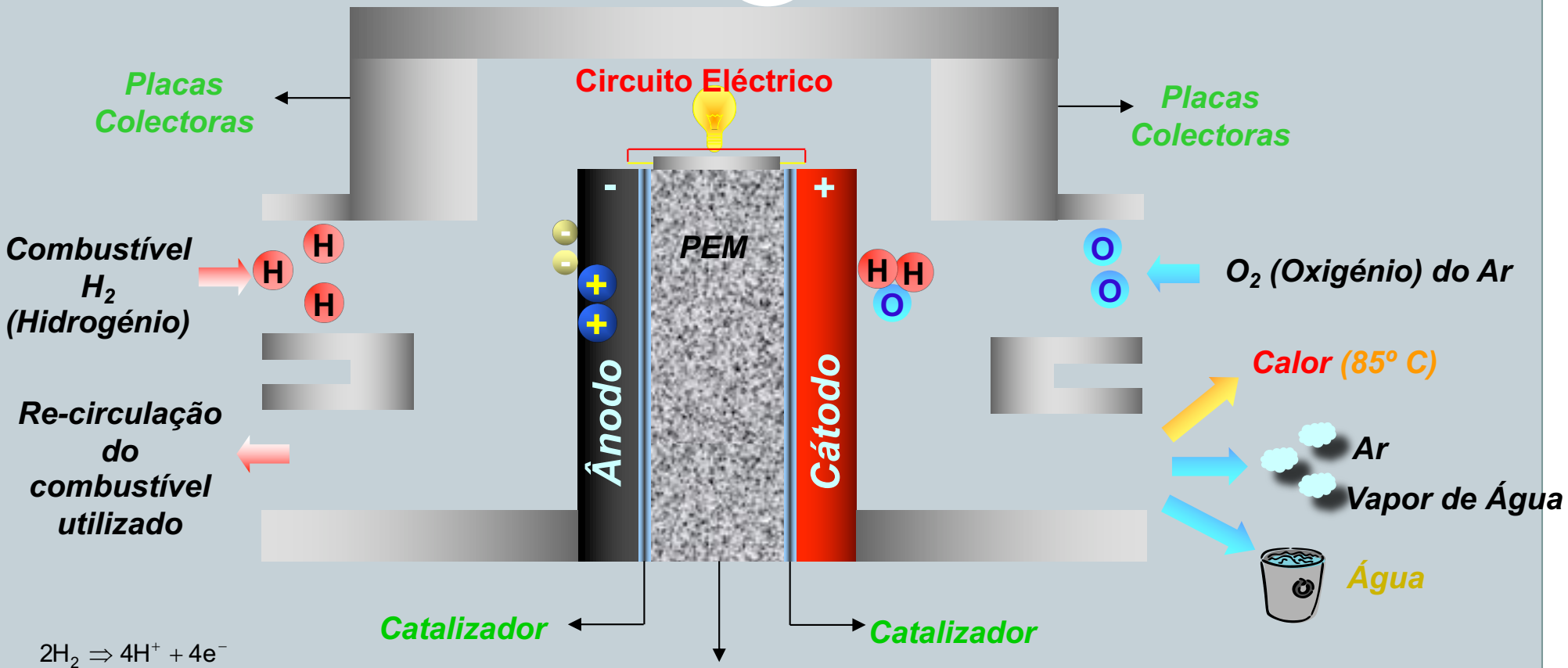


Bateria



Pilha de combustivel

Principio de funcionamento da pilha de combustível



$$2H_2 \Rightarrow 4H^+ + 4e^-$$
$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \Rightarrow 2H_2O$$
$$2H_2 + O_2 \Rightarrow 2H_2O$$

Espectro de aplicações das Pilhas de Combustivel



TIPO	ELECTRÓLITO	COMBUSTÍVEL	TEMPERATURA DE FUNCIONAMENTO	VANTAGENS	DESVANTAGENS	DIMENSÃO TÍPICA	APLICAÇÕES
ALCALINA (AFC)	HIDRÓXIDO DE POTÁSSIO	HIDROGÉNIO PURO	50-200	ELEVADA DENSIDADE DE POTÊNCIA APLICAÇÕES AEROESPACIAIS	MUITO SENSÍVEL A COMBUSTÍVEL IMPURO INTOLERANTE A DIÓXIDO DE CARBONO	< 7KW	VEÍCULOS ESPACIAIS
MEMBRANA POLIMÉRICA (PEMFC)	MEMBRANAS DE TROCA IÓNICA	HIDROGÉNIO PURO	50-100	A MAIOR DENSIDADE DE POTÊNCIA REDUZIDOS PROBLEMAS DE CORROSÃO REDUZIDOS PROBLEMAS DE GESTÃO DO ELECTRÓLITO ARRANQUE RÁPIDO	CATALISADORES CAROS MUITO SENSÍVEL A COMBUSTÍVEL IMPURO	5-250KW	VEÍCULOS E APLICAÇÕES MÓVEIS SISTEMAS DE CO-GERAÇÃO DE BAIXA POTÊNCIA
ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC)	ÁCIDO FOSFÓRICO LIQUIDO IMOBILIZADO NUMAMATRIZ	HIDROGÉNIO	220	BOA PRODUÇÃO DE CALOR PARA CO-GERAÇÃO LONGA DURABILIDADE	CATALISADORES CAROS BAIXA DENSIDADE DE POTÊNCIA	200KW	SISTEMAS DE CO-GERAÇÃO
CARBONATO FUNDIDO (MCFC)	CARBONATO FUNDIDO LIQUIDO IMOBILIZADO NUMA MATRIZ CERÂMICA	METANO, HIDROGÉNIO, MONÓXIDO DE CARBONO	650	BOA PRODUÇÃO DE CALOR CATALISADORES BARATOS TOLERANTE A COMBUSTÍVEL IMPURO	ELEVADAS TEMPERATURAS POTENCIAM CORROSÃO E FALHA NOS COMPONENTES DA PILHA BAIXA DENSIDADE DE POTÊNCIA	2-3MW	SISTEMAS DE CO-GERAÇÃO DE GRANDE DIMENSÃO
ÓXIDO SÓLIDO (SOFC)	CERÂMICO	METANO, HIDROGÉNIO, MONÓXIDO DE CARBONO	500-1000	BOA PRODUÇÃO DE CALOR CATALISADORES BARATOS TOLERANTE A COMBUSTÍVEL IMPURO ELECTRÓLITO SÓLIDO	ELEVADAS TEMPERATURAS POTENCIAM CORROSÃO E FALHA NOS COMPONENTES DA PILHA SELAGEM DAS CAMADAS DA PILHA	100-500KW (TUBULAR) 50-100KW (PLANAR)	TODO O TIPO DE SISTEMAS DE CO-GERAÇÃO

Modelo eléctrico de uma pilha de combustível

$$U_{pilha} = E(c) - Vp(i)$$

$$E = N_0 \left[E_0 + \frac{RT}{2F} \log \left(\frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right) \right]$$

U_{pilha} é a tensão de saída da pilha

E(c) É é a força electromotriz em função da utilização de combustível (admitindo constantes todas as restantes variáveis), também designada por força electromotirz instatante de Nernst

Vp(i) são as quedas de tensão internas dependentes da densidade da corrente de saída (*i*)

Modelo eléctrico de uma pilha de combustível

OS DIFERENTES TIPOS DE PERDAS PODEM DIVIDIR-SE EM:

- PERDAS DE ACTIVAÇÃO
- PERDAS DE CONCENTRAÇÃO
- PERDAS ÓHMICAS

Modelo eléctrico de uma pilha de combustível

AS **PERDAS DE ACTIVAÇÃO** RESULTAM DA DIMINUIÇÃO DA VELOCIDADE DAS REACÇÕES QUÍMICAS NA SUPERFÍCIE DOS ELÉCTRODOS.

ESTAS PERDAS PODEM SER DESPREZADAS PARA ALTAS TEMPERATURAS E PRESSÕES.

ESTAS PERDAS SÃO DOMINANTES PARA BAIXOS VALORES DE DENSIDADE DE CORRENTE.

$$V_{activation} = N_0\left(\frac{RT}{2\alpha F}\right)\ln\left(\frac{I_{dc}}{I_0}\right)$$

Modelo eléctrico de uma pilha de combustível

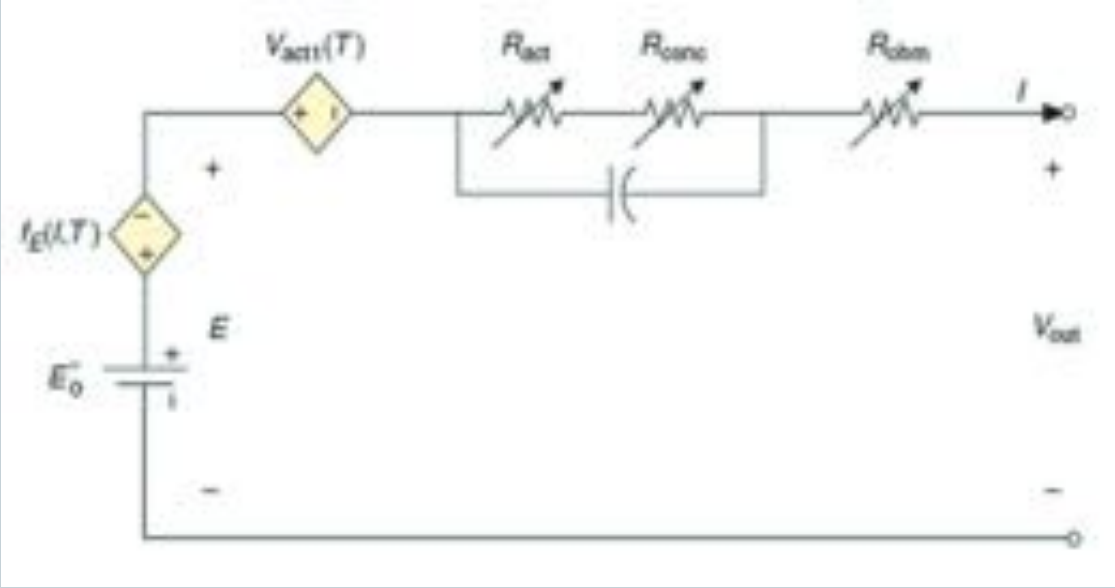
AS **PERDAS DE CONCENTRAÇÃO** RESULTAM DA ALTERAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DOS REAGENTES NA SUPERFÍCIE DOS ELÉCTRODOS À MEDIDA QUE ESTES SÃO CONSUMIDOS. SÓ SE TORNAM IMPORTANTES PERTO DO LIMITE DA DENSIDADE DE CORRENTE.

$$V_{concentration} = -\frac{RT}{2F}\ln\left(1-\frac{I_{dc}}{I_{Lim}}\right)$$

AS **PERDAS ÓHIMICAS** RESULTAM DA RESISTÊNCIA À CIRCULAÇÃO DOS IÕES ATRAVÉS DO ELECTRÓLITO, BEM COMO DOS ELECTRÕES ATRAVÉS DOS ELÉCTRODOS E RESPECTIVAS LIGAÇÕES. ESTAS PERDAS SÃO LINEARES COM A DENSIDADE DE CORRENTE. SE DESIGNARMOS A RESISTÊNCIA INTERNA POR R OBTÉM-SE:

$$V_{ohmic} = R_{FC} I_{dc} \qquad r = r_0 e^{c\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T}\right)}$$

Modelo eléctrico de uma pilha de combustível



E - POTENCIAL INTERNO

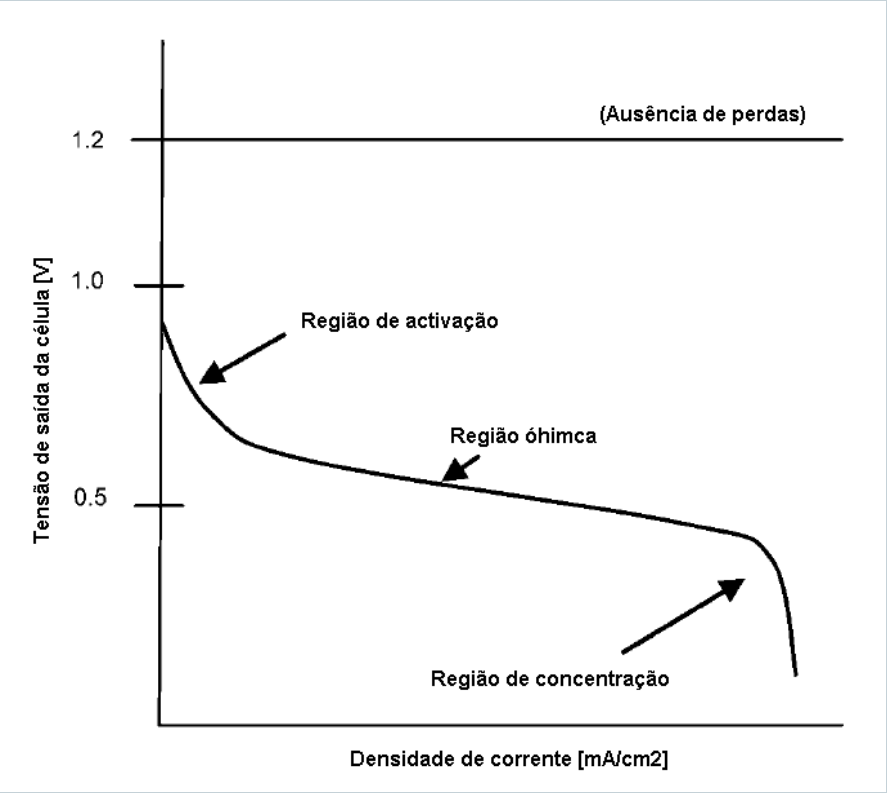
E_0 - POTENCIAL DE REFERÊNCIA EM CONDIÇÕES PADRÃO (298K E 1ATM)

$F_E(I,T)$ - DIFERENÇA DE POTENCIAL DEVIDA A ALTERAÇÕES NAS REACÇÕES QUÍMICAS E ATRASOS NO COMBUSTÍVEL E OXIDANTE

$V_{ACT1}(T)$ - QUEDA DE TENSÃO DEVIDA À ACTIVAÇÃO

R_{ACT}, R_{CONC} E R_{OHM} - RESISTÊNCIAS EQUIVALENTES DEVIDAS À ACTIVAÇÃO, CONCENTRAÇÃO E ÓHMICA.

Modelo eléctrico de uma pilha de combustível



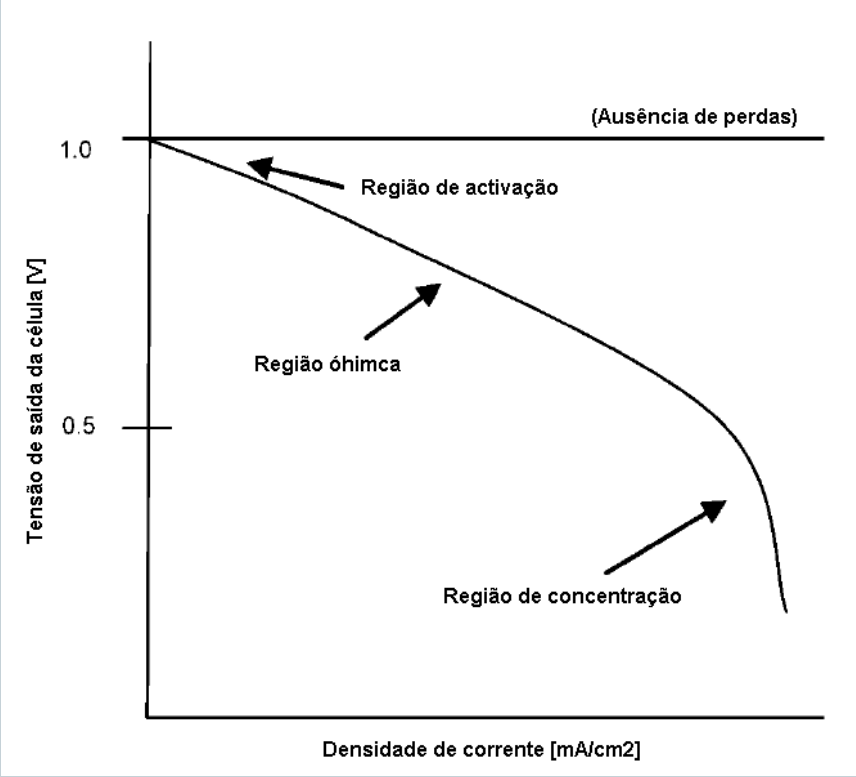
CURVA DE POLARIZAÇÃO PARA PILHAS DE COMBUSTÍVEL DE BAIXA TEMPERATURA (PEM)

PARA PEQUENOS VALORES DE DENSIDADE DE CORRENTE (REGIÃO DE ACTIVAÇÃO) EXISTE UMA PEQUENA REDUÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA.

PARA VALORES INTERMÉDIOS DE DENSIDADE DE CORRENTE (REGIÃO ÓHMICA) A RELAÇÃO É LINEAR.

PARA VALORES ELEVADOS DE DENSIDADE DE CORRENTE (REGIÃO DE CONCENTRAÇÃO) OCORRE UMA DIMINUIÇÃO ACENTUADA DA TENSÃO DE SAÍDA

Modelo eléctrico de uma pilha de combustível



CURVA DE POLARIZAÇÃO PARA PILHAS DE COMBUSTÍVEL DE ALTA TEMPERATURA (SOFC)

PARA PILHAS DE COMBUSTÍVEL DE ALTA TEMPERATURA A TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO É PRATICAMENTE IGUAL AO SEU VALOR IDEAL.

NESTE TIPO DE PILHAS PRATICAMENTE NÃO EXISTE REGIÃO DE ACTIVAÇÃO.

Pilhas de combustivel de outros sistemas de armazenamento

Modalidades de armazenamento de energia eléctrica

a)Indirectamente em baterias

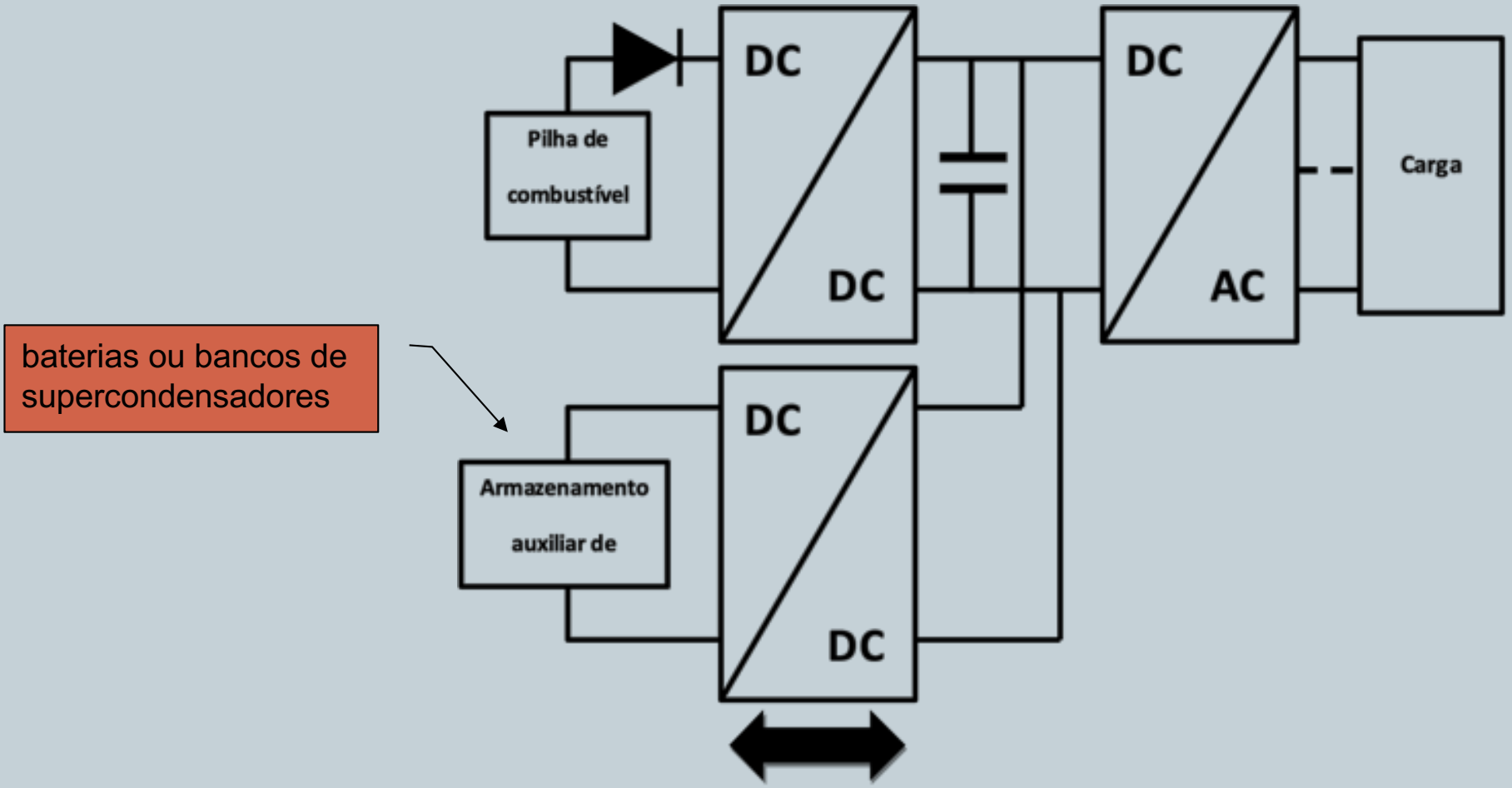
- a energia eléctrica é transformada em energia química
- este processo requere reacções de oxidação e redução para libertar a carga que providencia o trabalho eléctrico que ocorre entre dois electrodos com diferente potencial

b) Directamente em condensadores

- de forma electroestática, como uma acumulação de cargas positivas e negativas nas placas dos condensadores

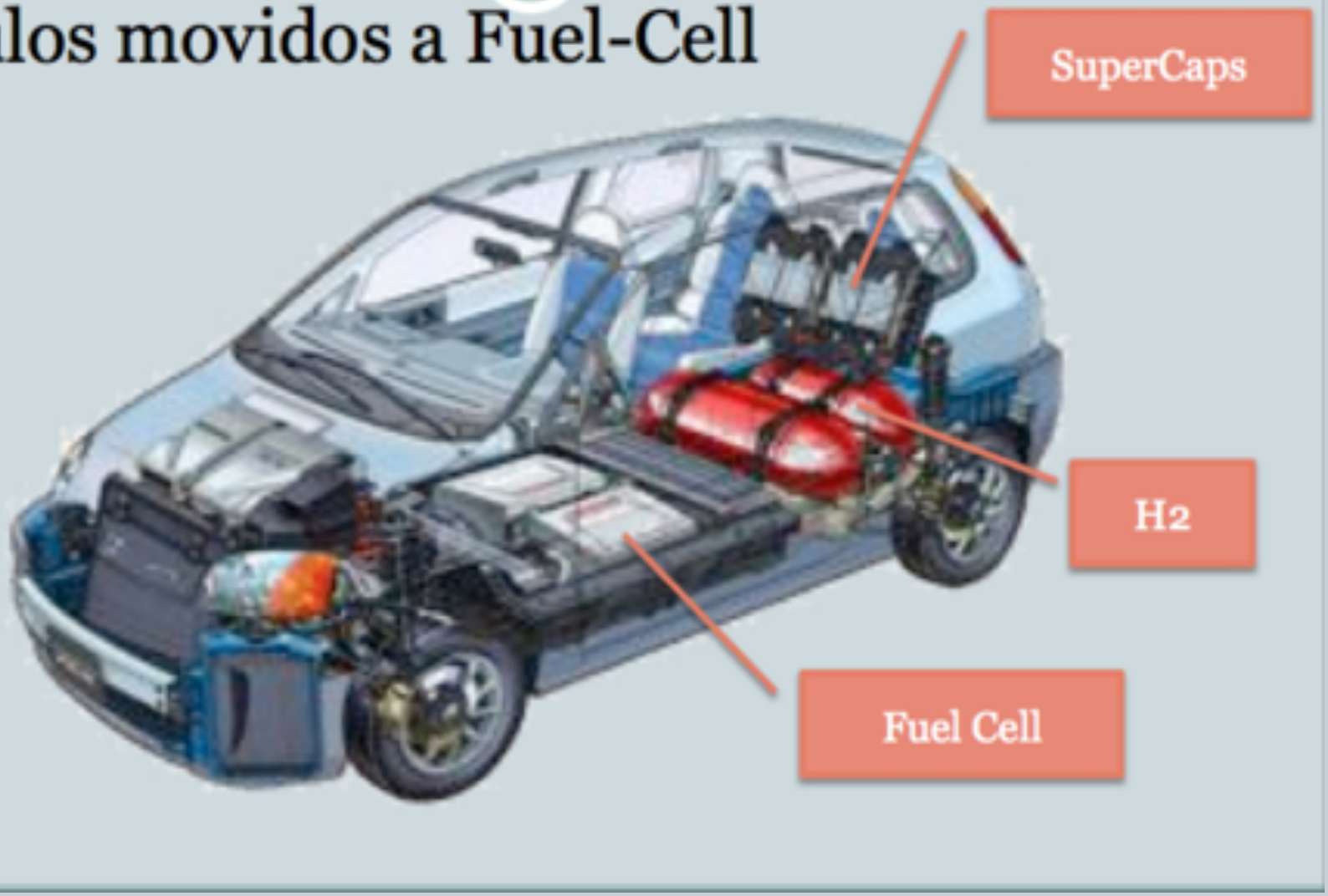
A eficiência destes dois modos de armazenamento de energia é maior do que em outros sistemas (por exemplo gasolina) porque envolvem processos reversíveis.

Pilhas de combustivel de outros sistemas de armazenamento

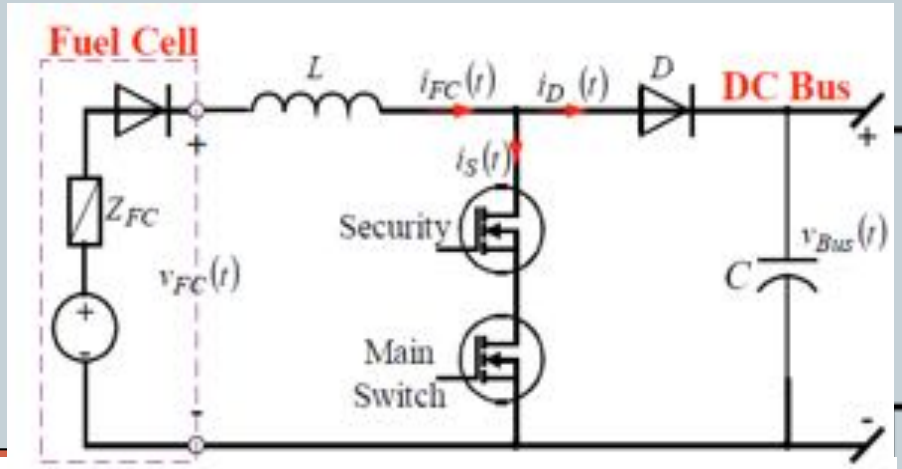


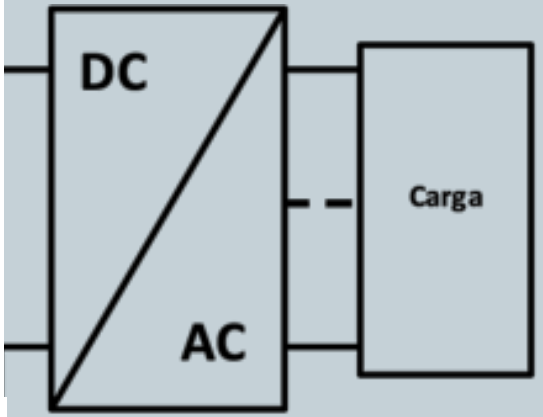
Pilhas de combustivel de outros sistemas de armazenamento

- Veiculos movidos a Fuel-Cell

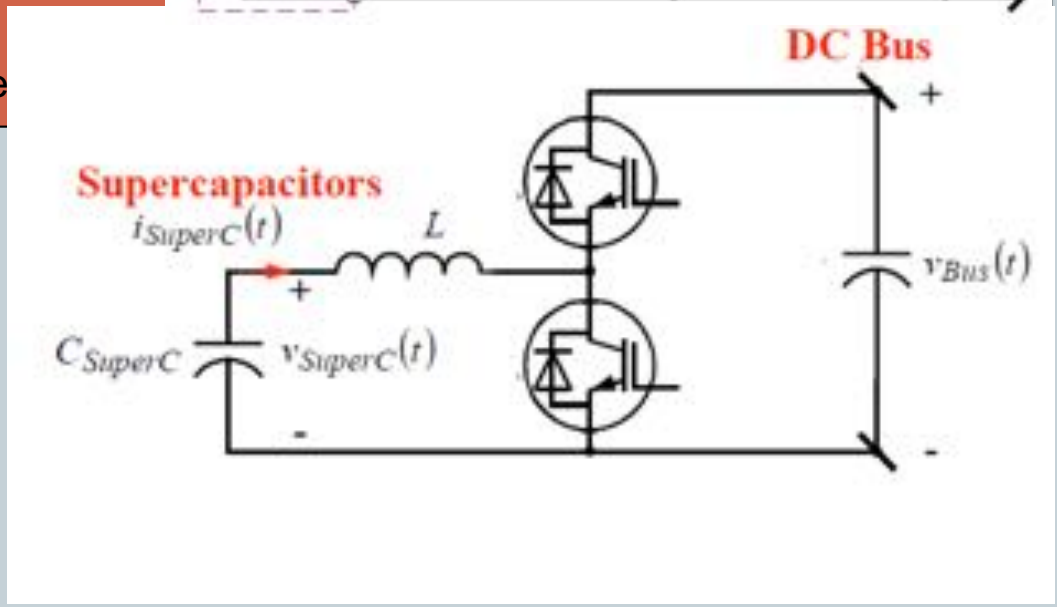


Pilhas de combustivel de outros sistemas de armazenamento

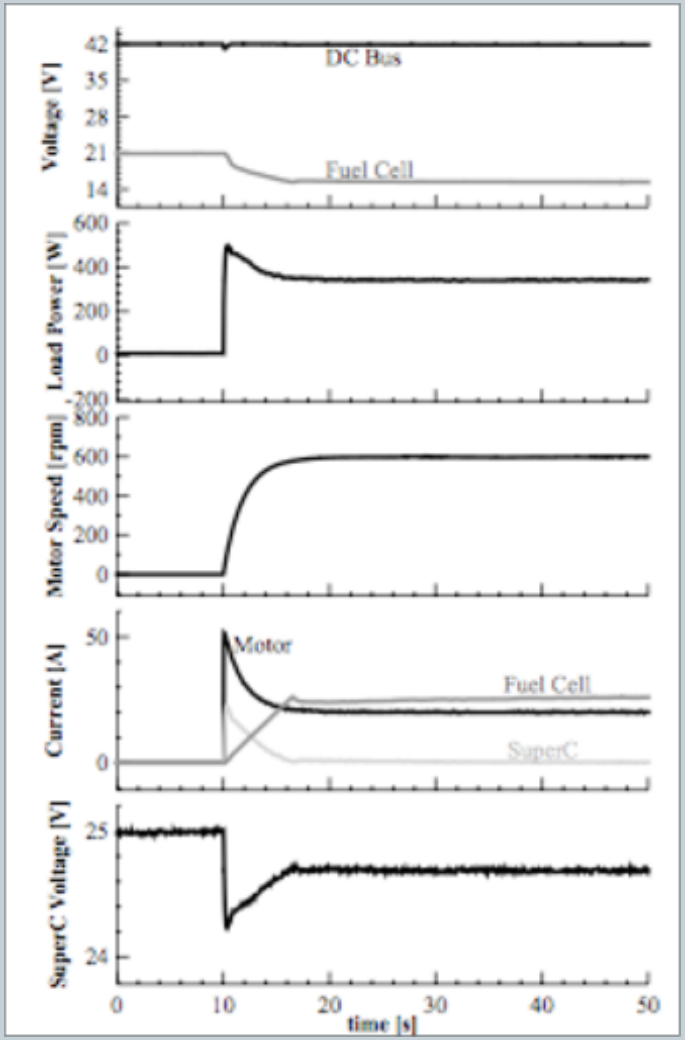


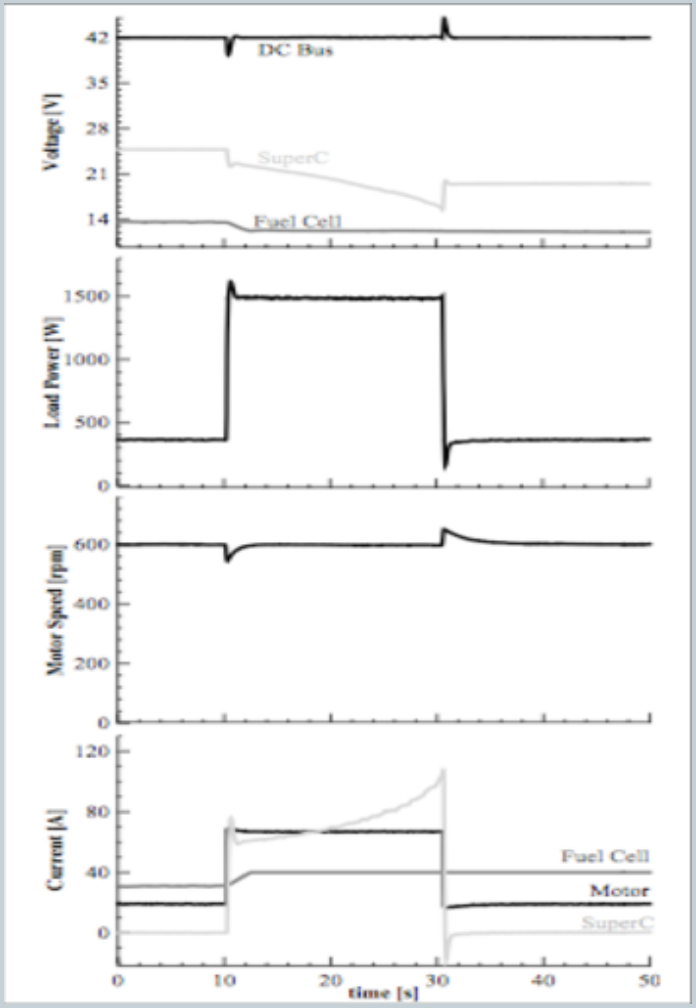


baterias ou
supercond



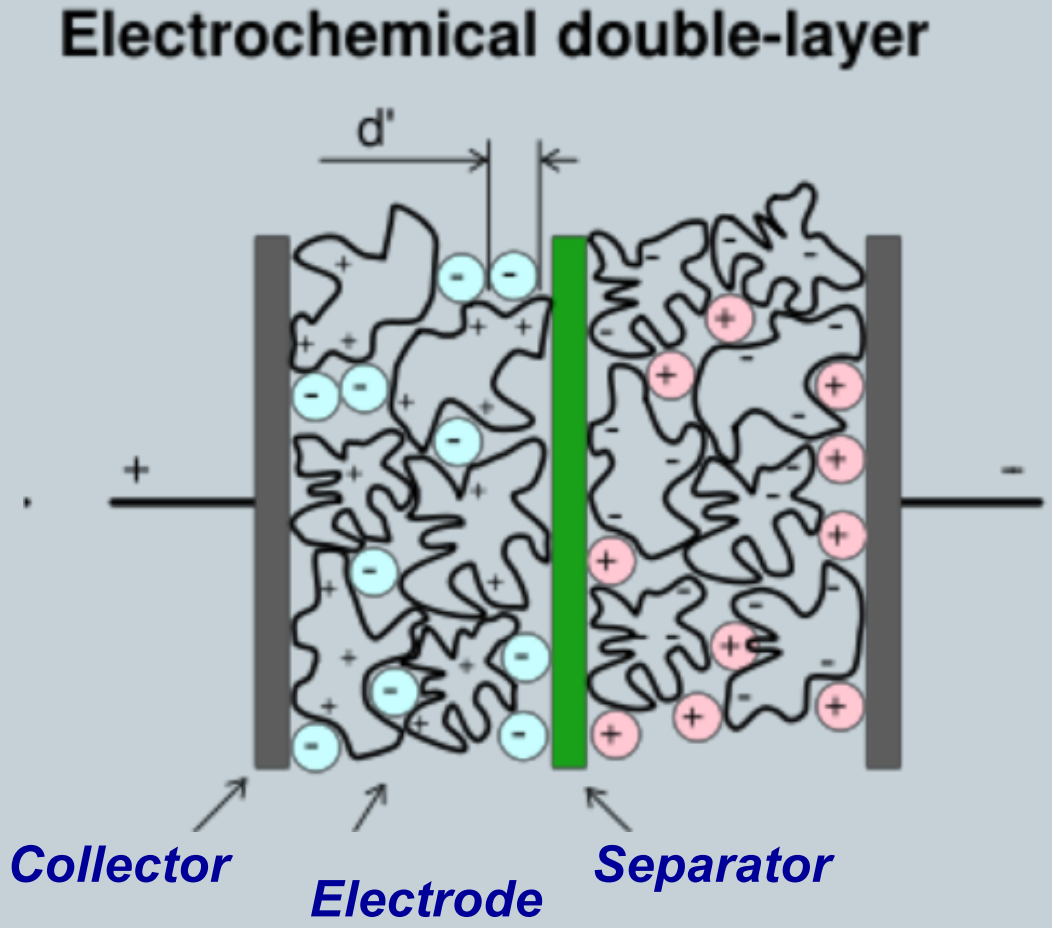
Pilhas de combustivel de outros sistemas de armazenamento





Supercondensadores ou condensadores electroquimicos de dupla camada

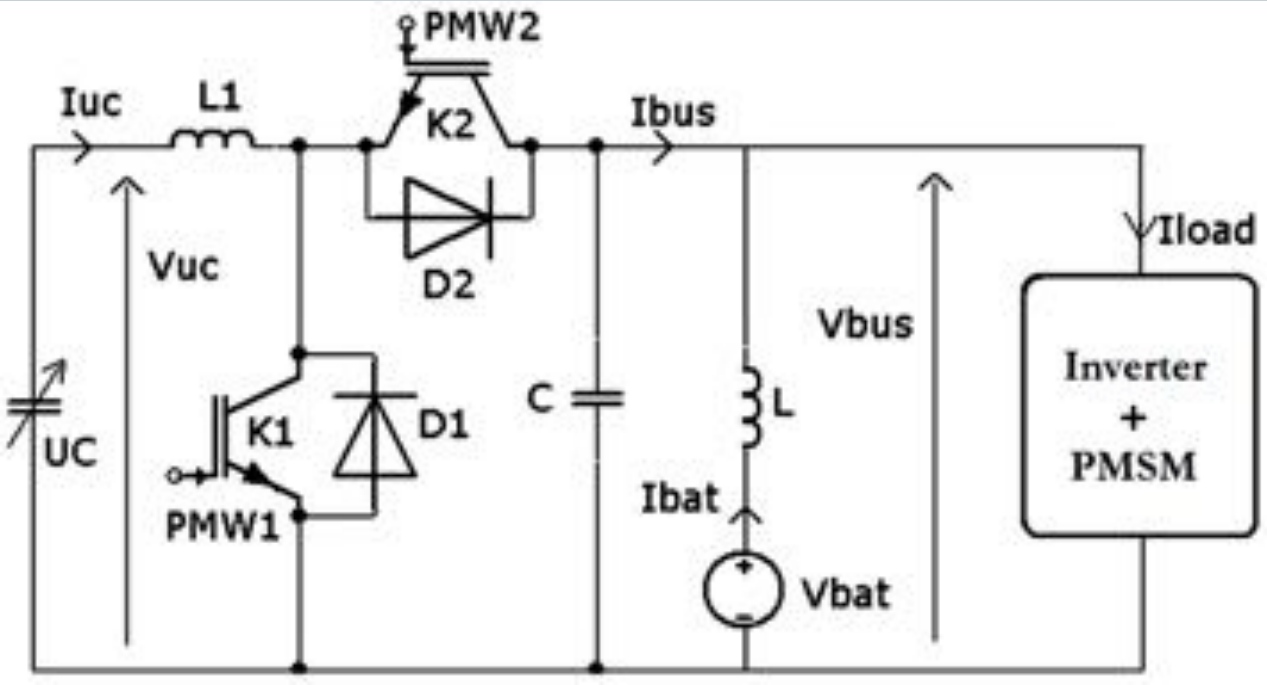
Supercondensadores armazenam energia eléctrica no interface entre uma elevada superfície de, por exemplo, carvão activado, cerâmica etc, e um eletrólito liquido.



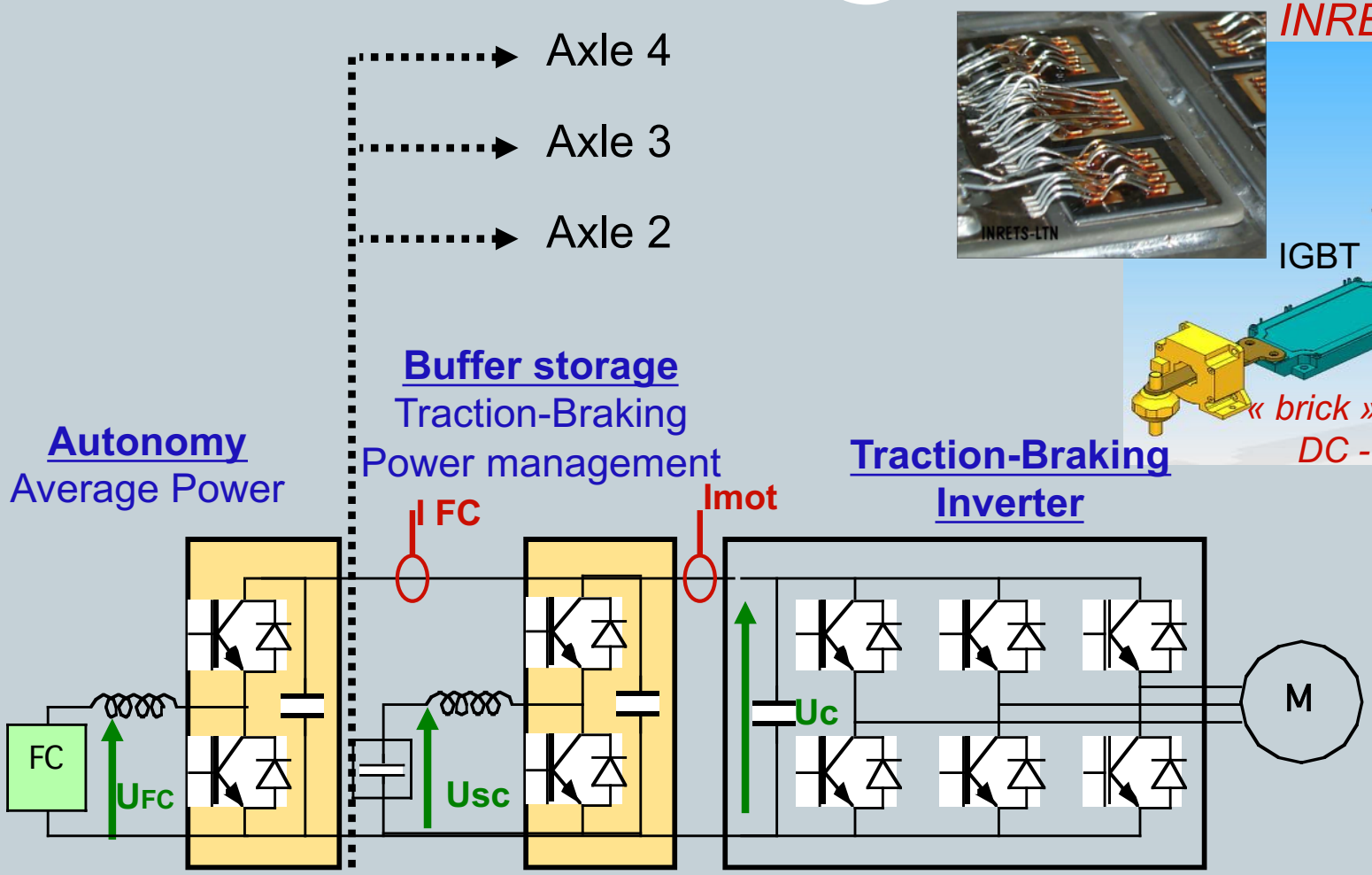
Baterias versus supercondensadores

Characterícitic	SLI battery (starting – lighting – ignition) lead acid, state of the art	Supercapacitor
Charge time	0,5 – 6 h	0,3 – 2 s
Discharge time	10 – 30 minutes	0,3 – 2 s
Cycles	200 – 700	> 500.000
Specific energy (Wh/kg)	25 - 40	1 - 5
Specific power (kW/kg)	0,1 – 0,3	5 – 10

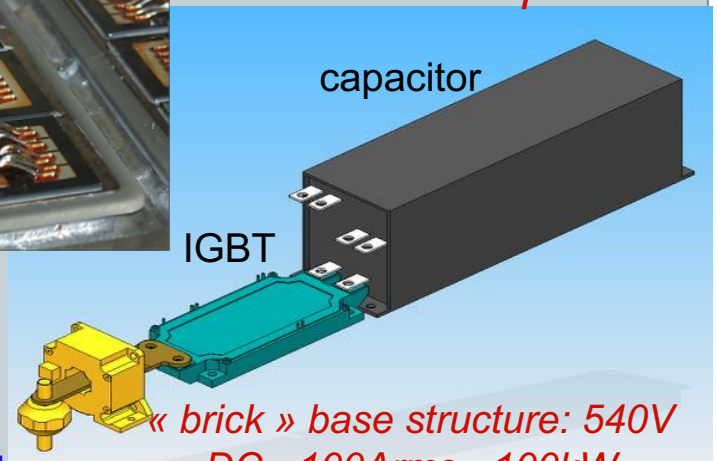
Interligação electrónica de supercondensadores



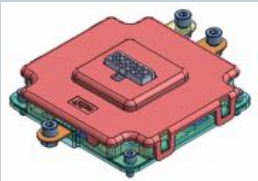
Interligação electrónica de supercondensadores



INRETS concept



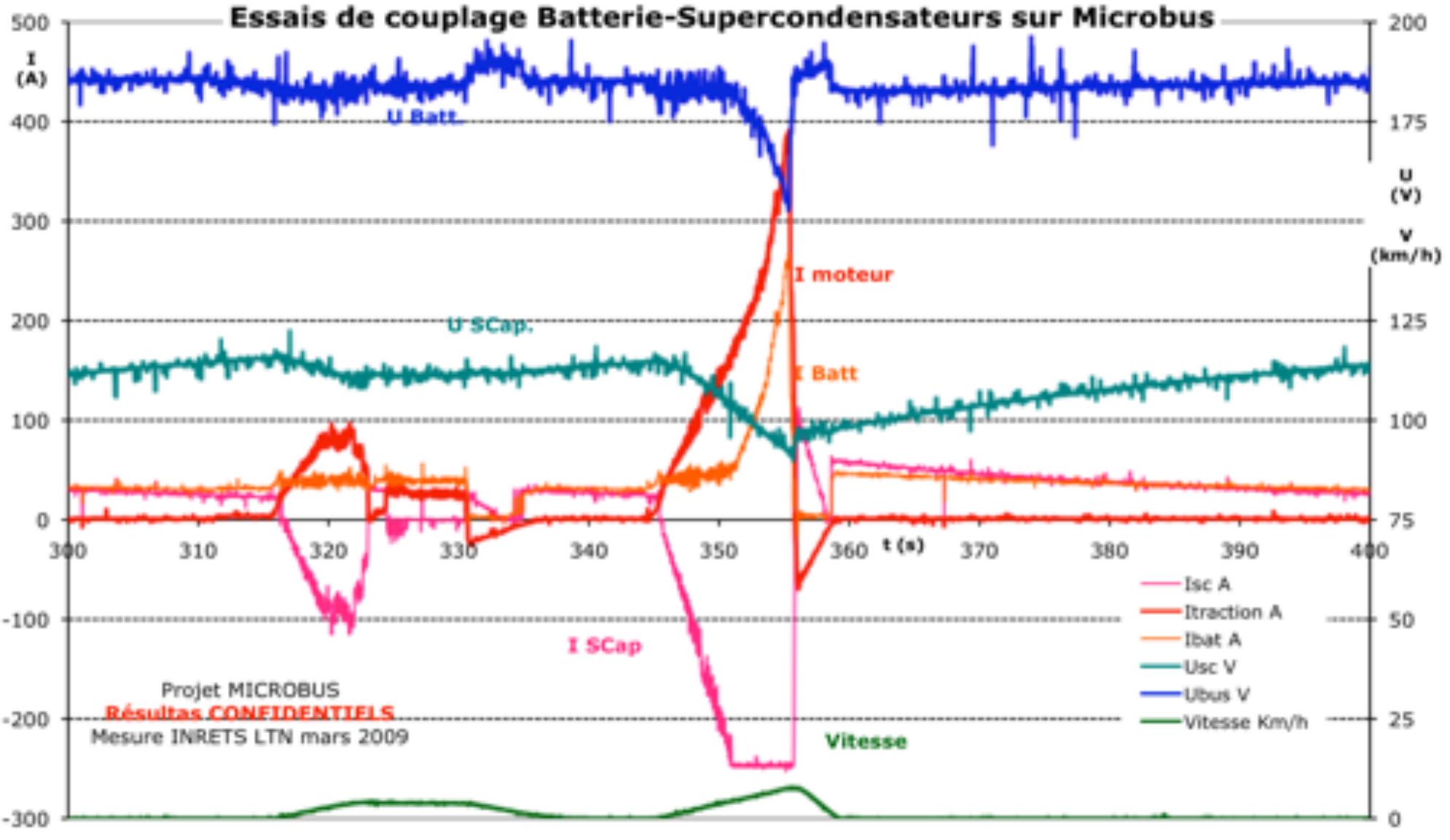
« brick » base structure: 540V
DC - 100Arms - 100kW



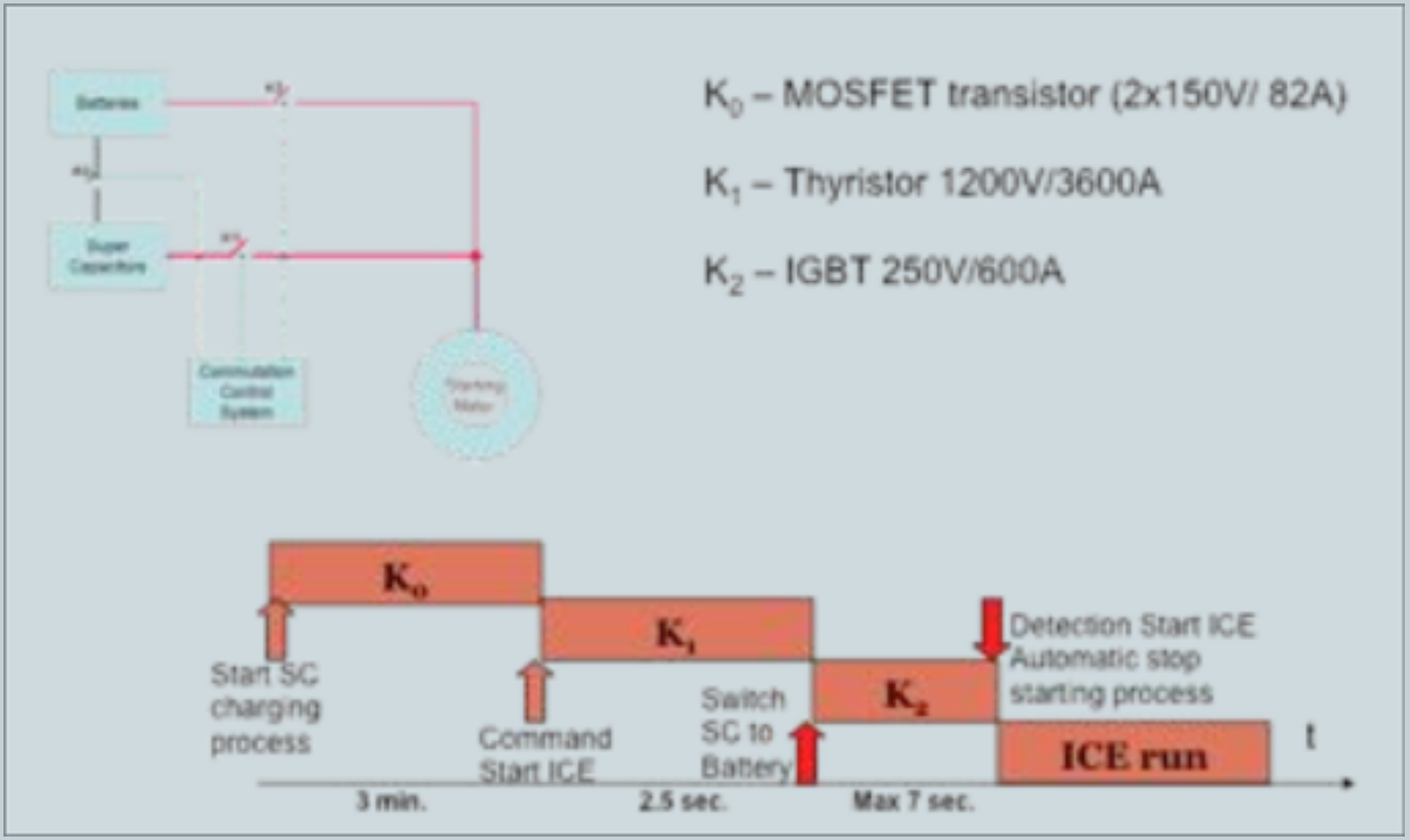
FC (0,7V/cell) & Scap (2,7V /cell) are low voltage technologies

Validation of INRETS Scap assembly
Microbus Tests : 150V - 250A - 60 cells

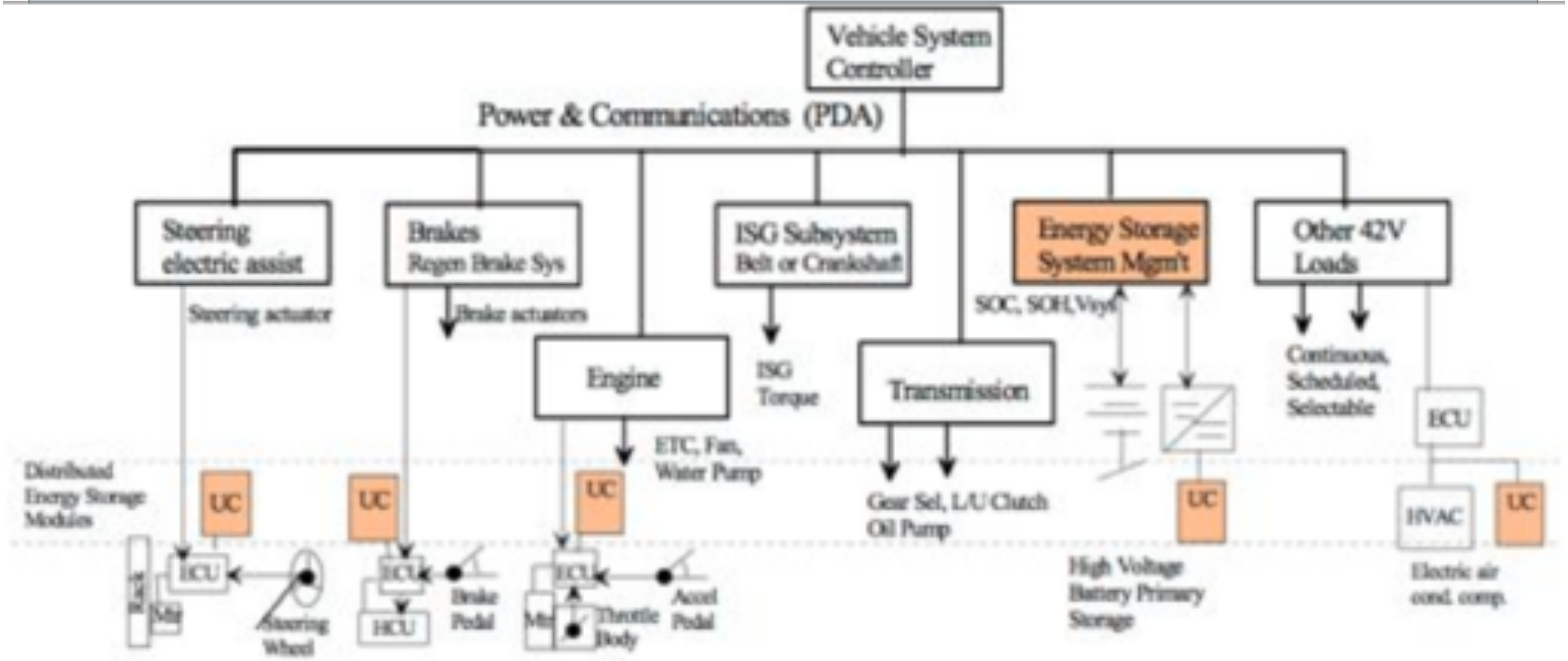
Confidentiel



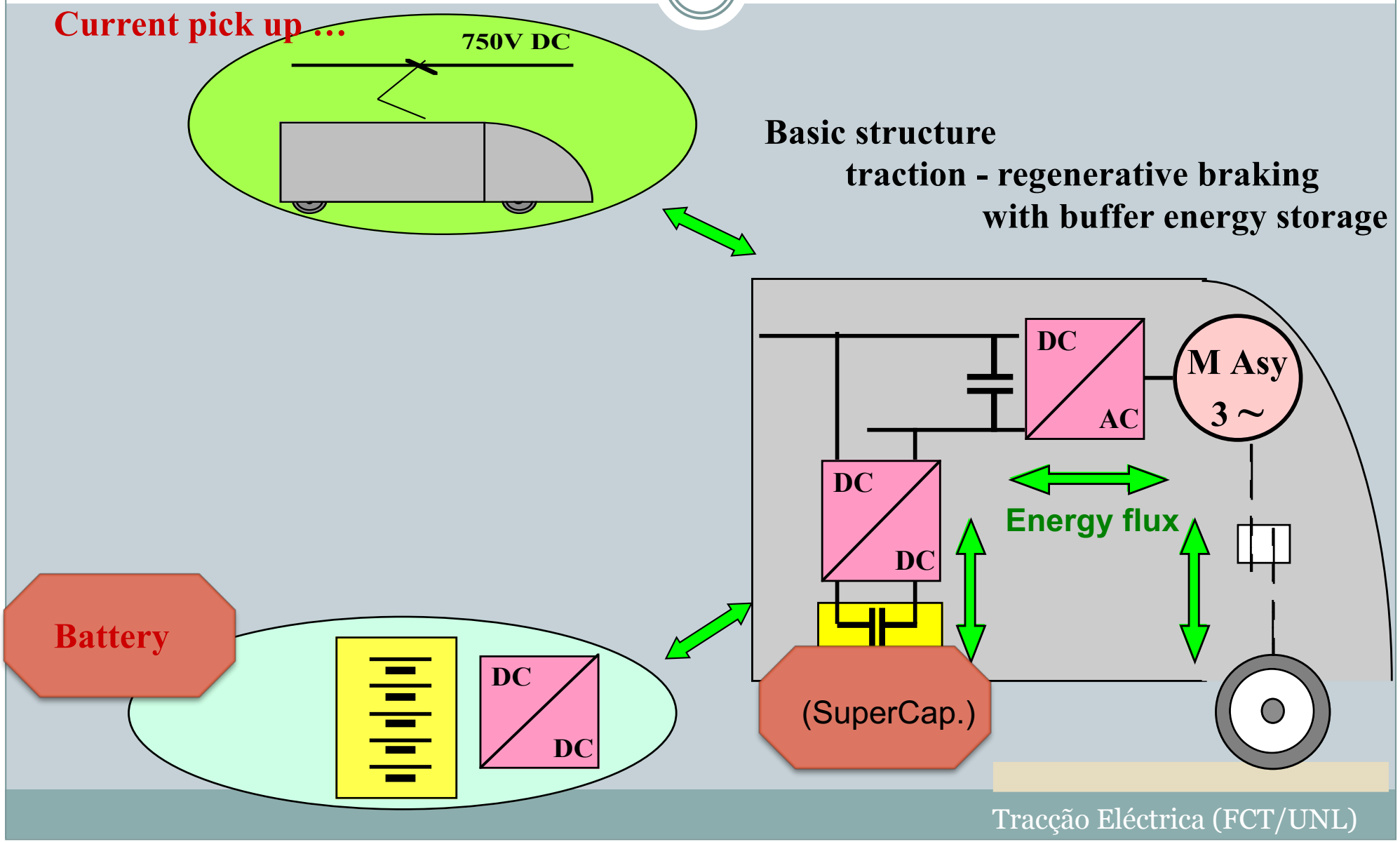
Arranque de locomotiva (exemplo)



Dominio de aplicação de SC num veiculo



Arquitectura híbrida
Bateria + Supercondensadores



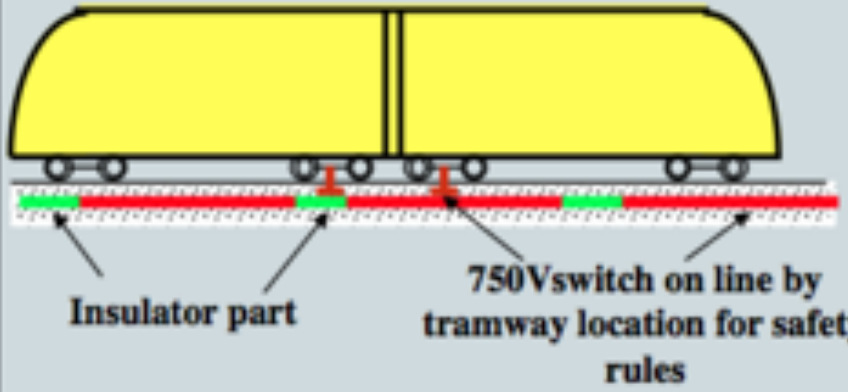
Recuperação de energia



Metro ligeiro

- Catenary-free operation
  - Necessidade de armazenamento on-board

Ground power supply principle





Metro ligeiro

1 - buffer storage : 10 seconds

- energy smoothing on urban cycle traction / regenerative braking

Using for any urban vehicle ("startor-generator-booster" system)

2 - local autonomy : 50-100 meters

- crossroad, tunnel or bridge, view on historical place

Using for any urban vehicle, case of hybrid cars

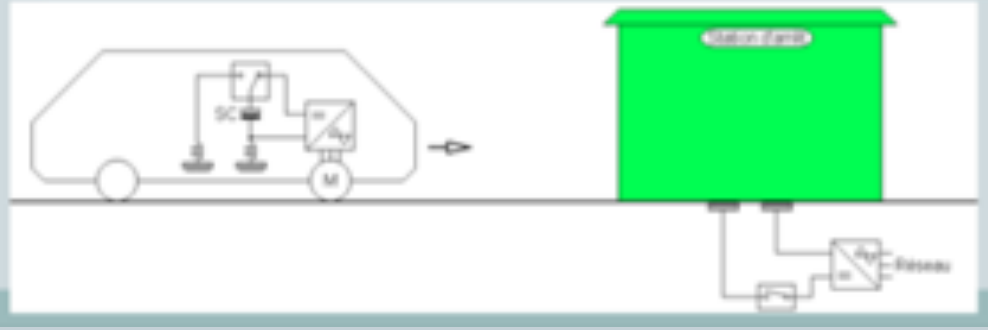
EDLC, flywheel domain

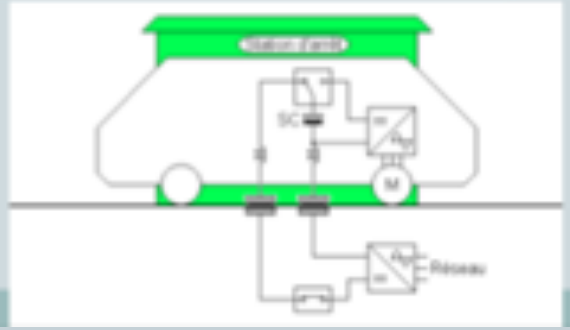
3 - inter-station autonomy: 500-1000 meters

- fast recharging concept at station-stop

For public transport "zero émission"

Battery,diesel, FuelCell domain



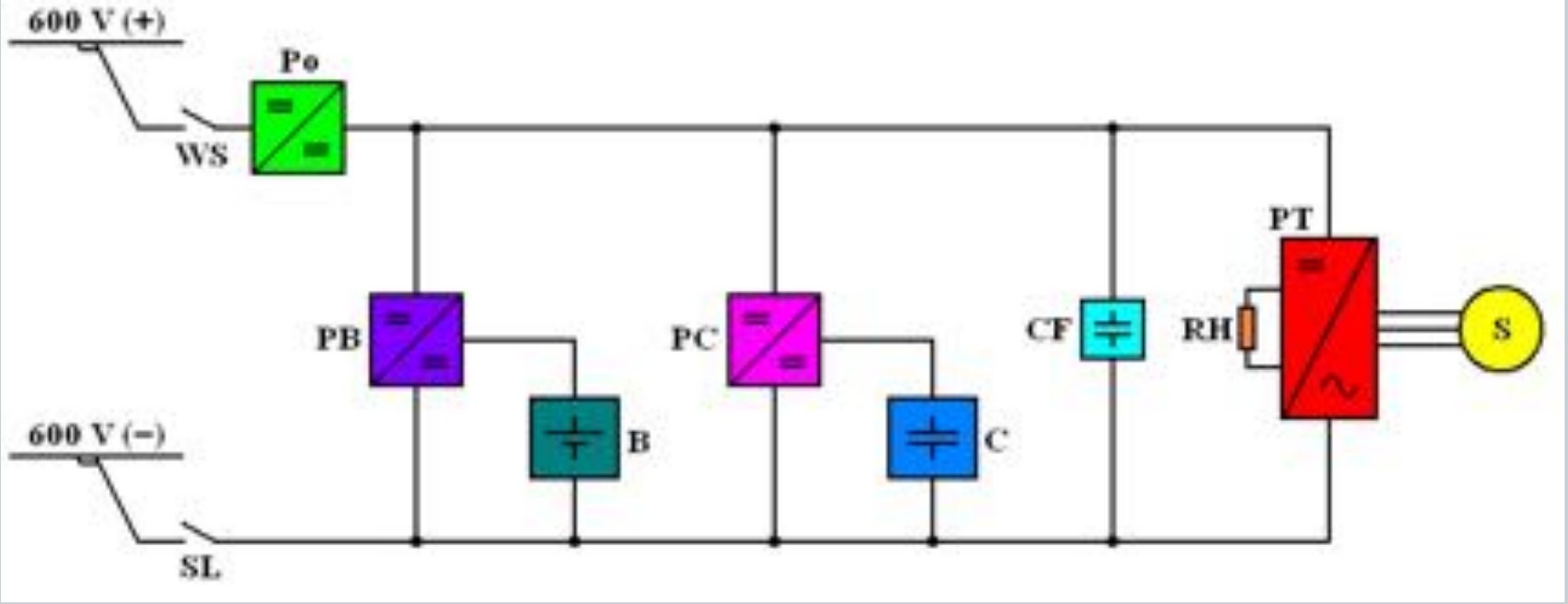


Arquitectura híbrida
Bateria + Supercondensadores

Project with supercapacitor and battery energy storage system realized by Electrotecnic Institute Warsaw Poland, with MPK Lublin in trolleybus PR110 in Lublin



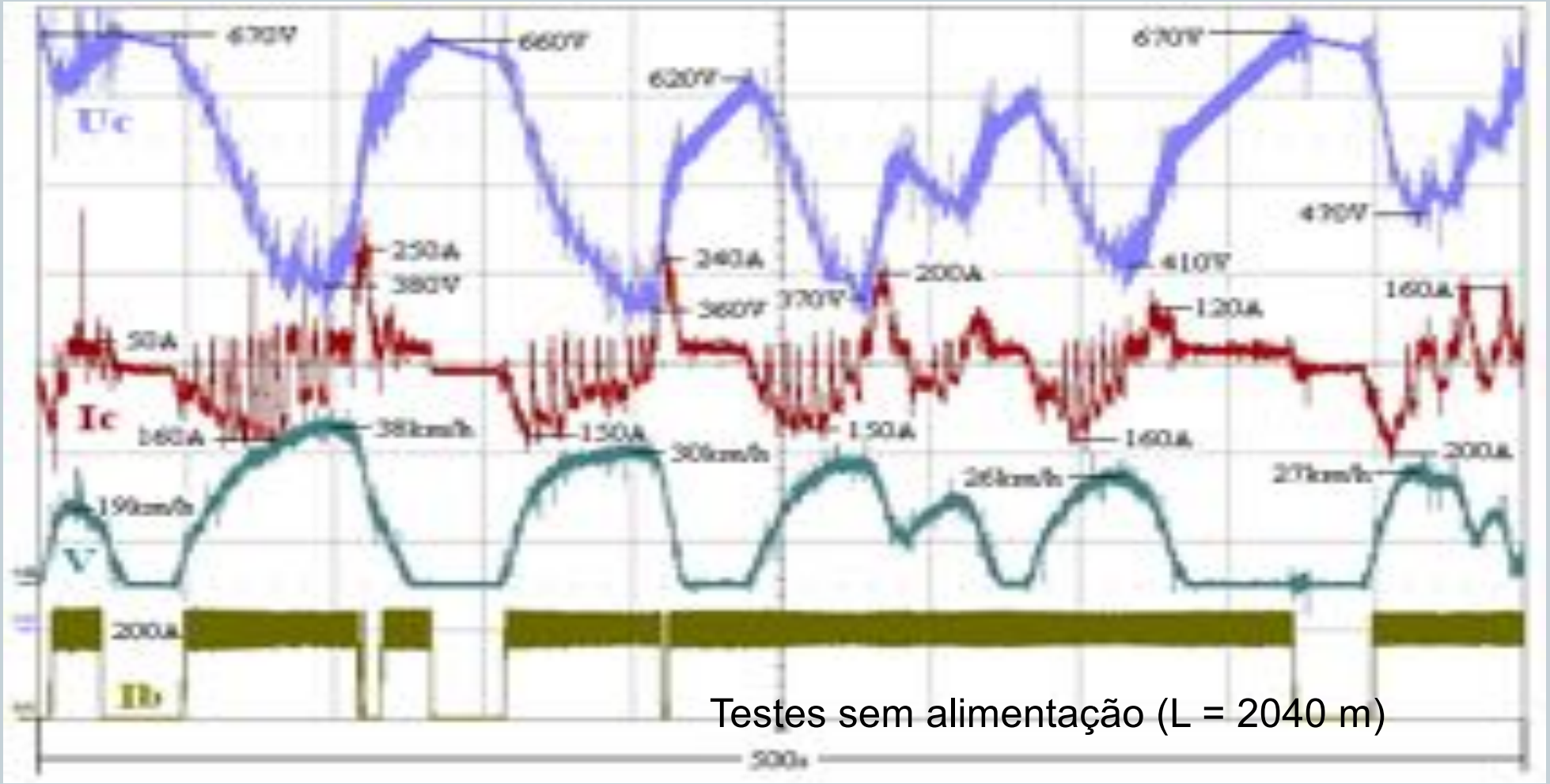
Arquitectura híbrida
Bateria + Supercondensadores



PC – Supercap converter
PB – Battery converter
Po – Recuperative braking converter
C – Supercap energy storage
B – Battery energy storage

CF – Filter capacitor
WS, SL – Line contactors
PT – Traction inverter
S – Traction motor
RH – Braking resistor

Arquitectura híbrida
Bateria + Supercondensadores



Testes sem alimentação (L = 2040 m)

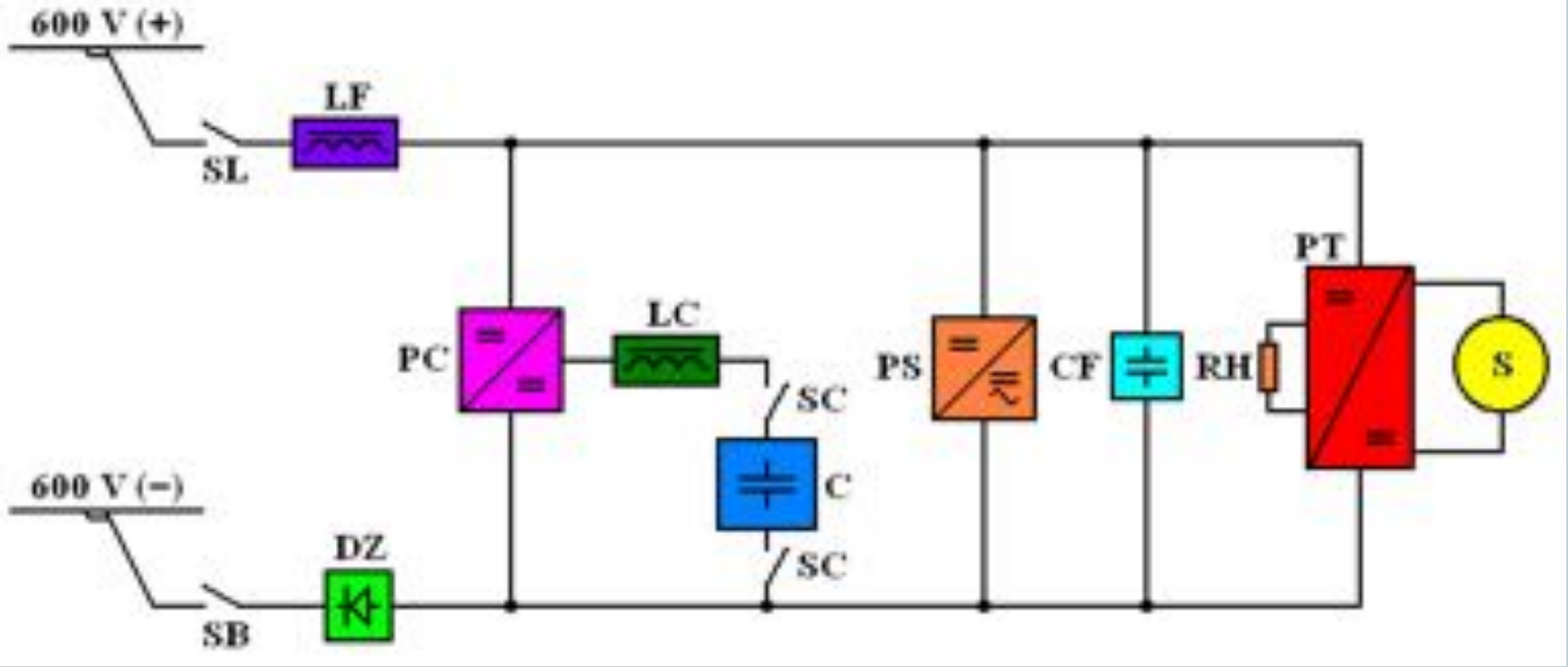
Uc – supercap voltage, Ic – supercap current, Ib – battery current V – trolleybus speed

Arquitectura híbrida
Supercondensadores

Project with supercapacitor energy storage system realized by Electrotecnic Institute Warsaw Poland, with Autrolis in trolleybus Jelcz M121 in Kaunas



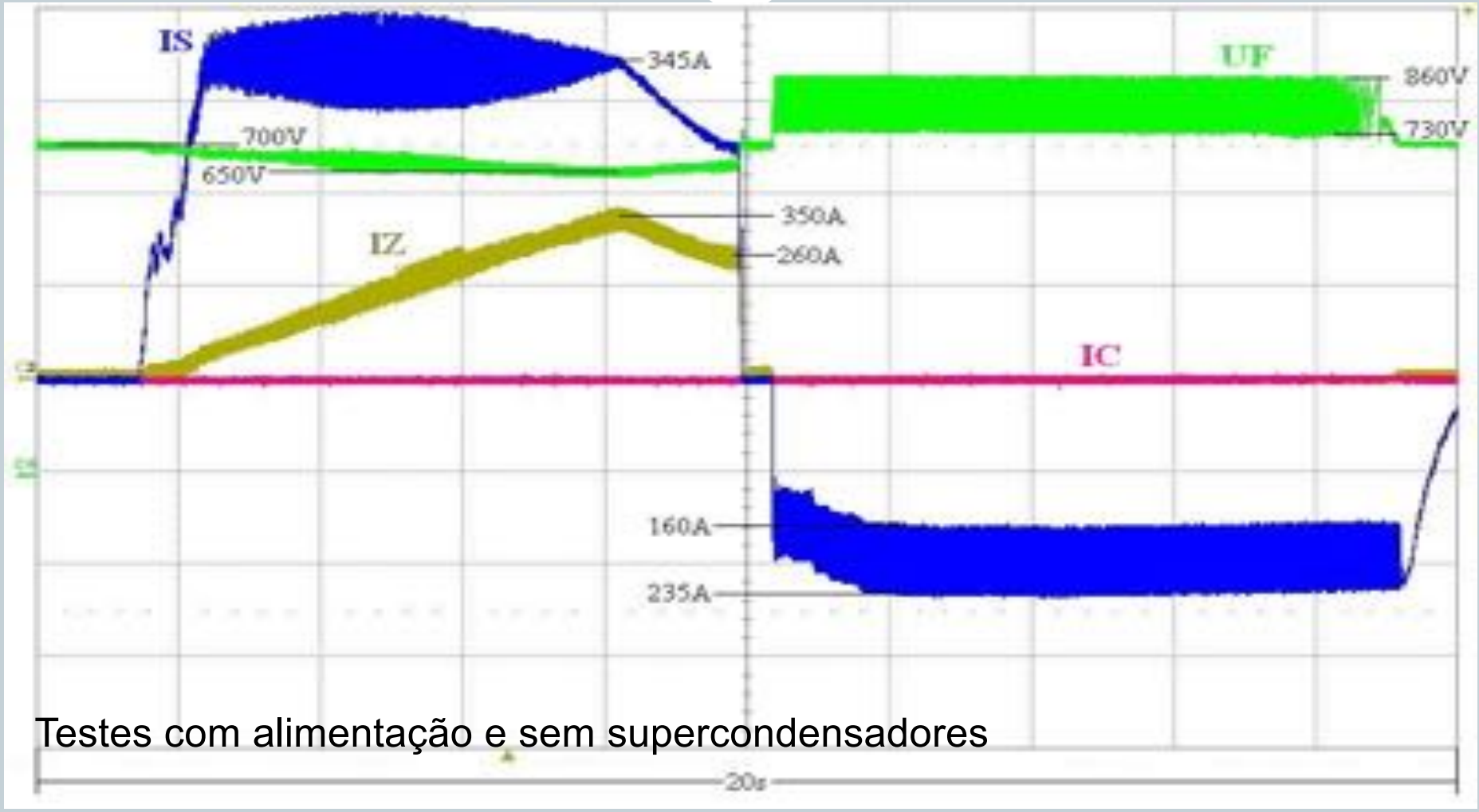
Arquitectura híbrida
Supercondensadores



PC – Supercap converter
C – Supercap energy storage 8,2 F / 750 V
SC – Supercap contactors
LC – Supercap inductor
LF – Filter inductor
CF – Filter capacitor

SL, SB – Line contactors
PT – Traction converter
S – Traction motor
RH – Braking resistor
PS – Static converter
DZ – Safety diode

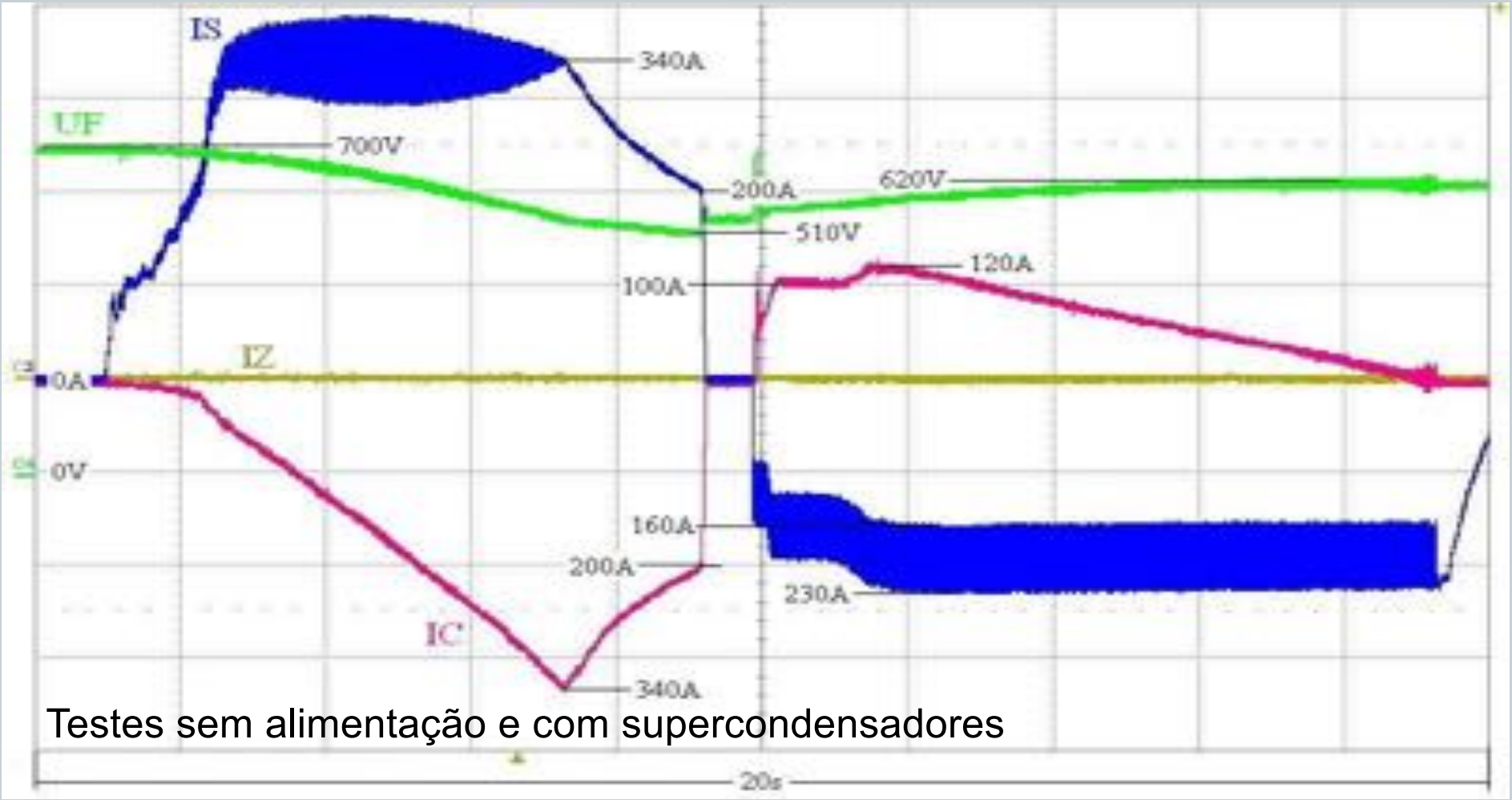
Arquitectura híbrida
Supercondensadores



Testes com alimentação e sem supercondensadores

IS – motor current, IC – supercap current, IZ – line current, UF – filter voltage

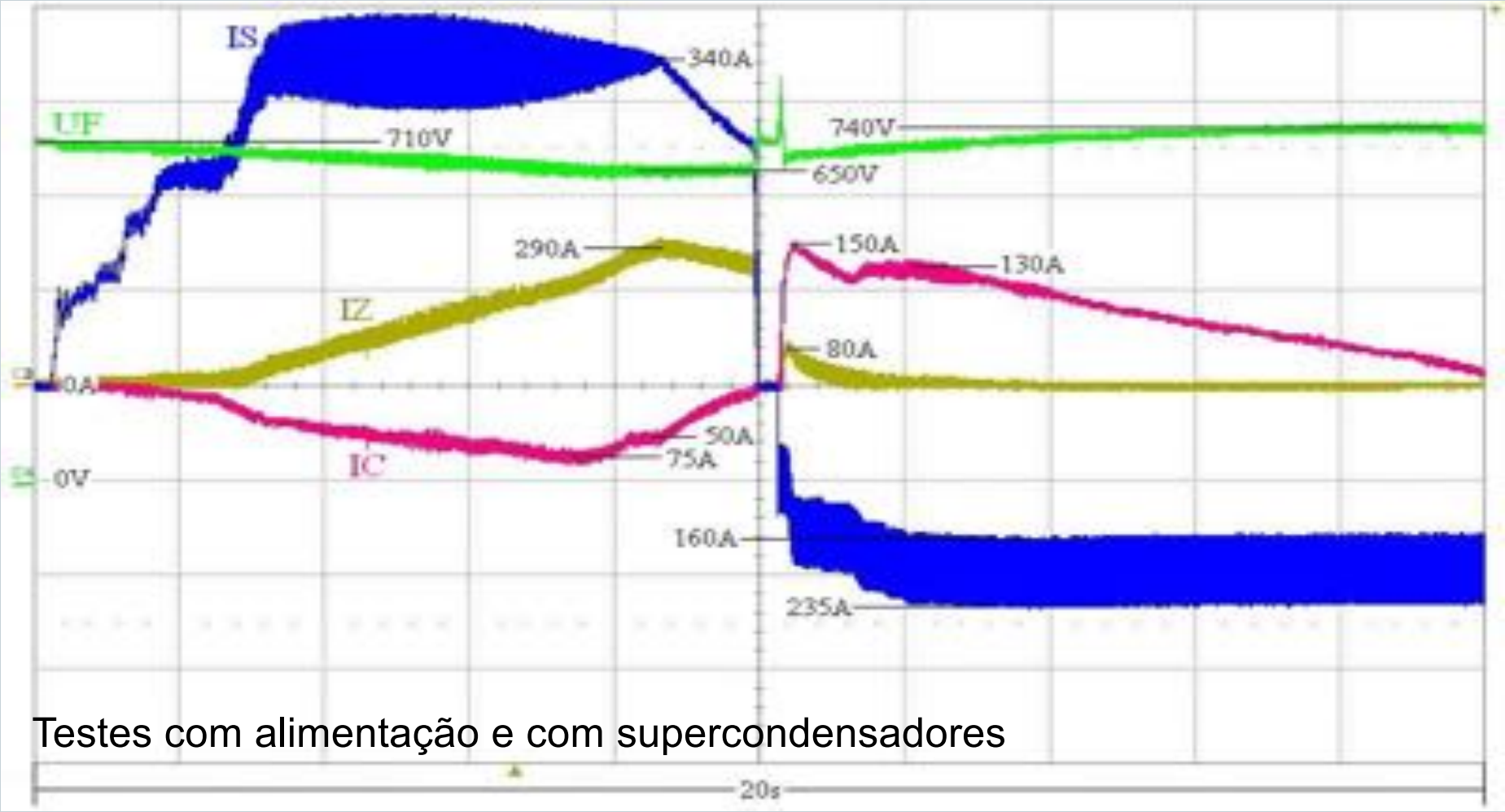
Arquitectura híbrida
Supercondensadores



Testes sem alimentação e com supercondensadores

IS – motor current, IC – supercap current, IZ – line current, UF – filter voltage

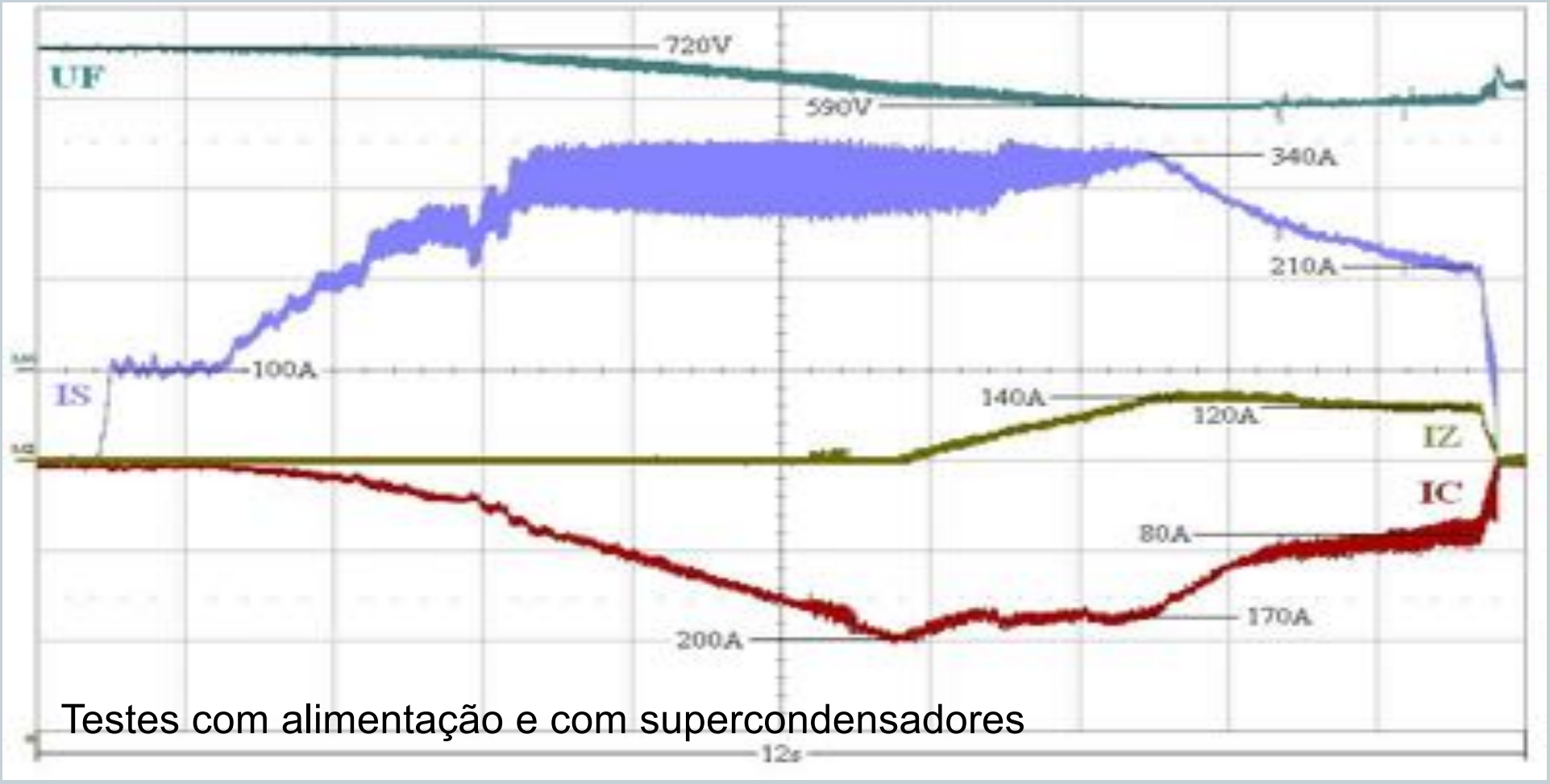
Arquitectura híbrida
Supercondensadores



Testes com alimentação e com supercondensadores

IS – motor current, IC – supercap current, IZ – line current, UF – filter voltage

Arquitectura híbrida
Supercondensadores



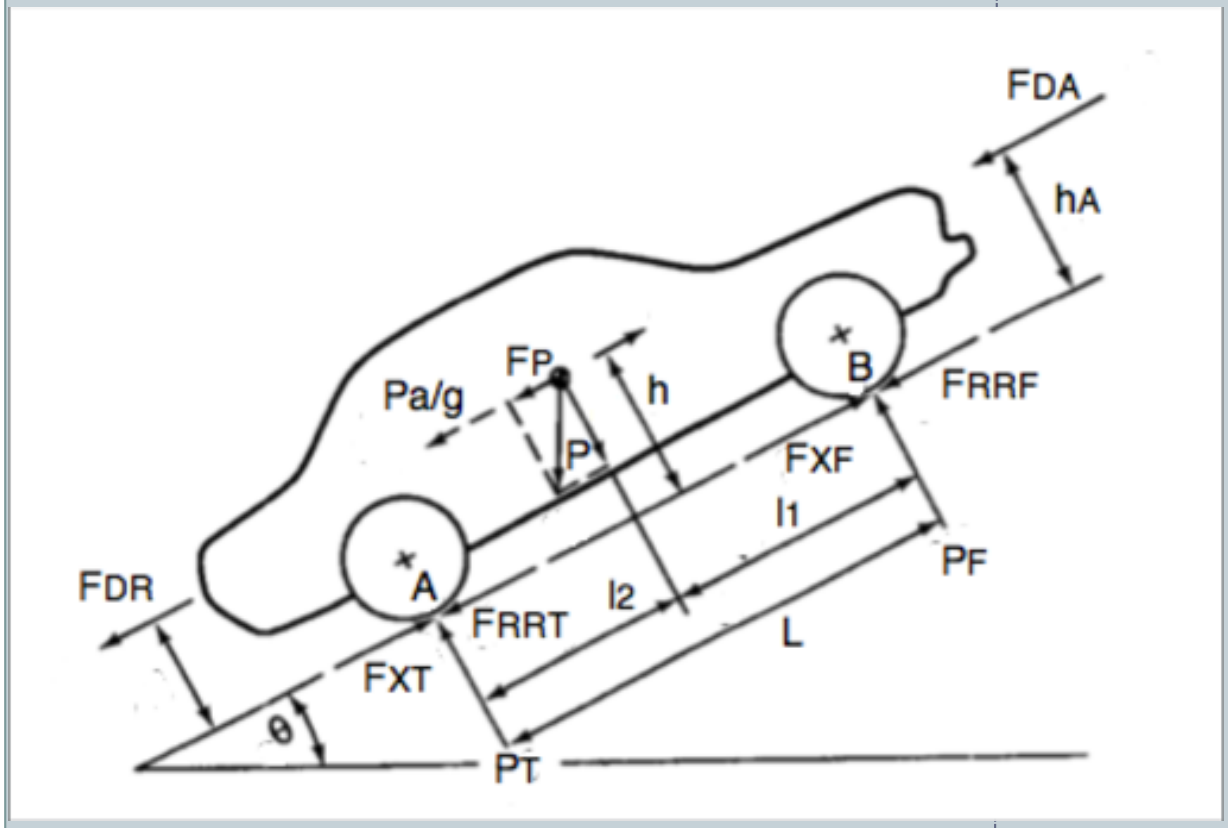
Testes com alimentação e com supercondensadores

IS – motor current, IC – supercap current, IZ – line current, UF – filter voltage

Arquitectura híbrida (Bateria +) Supercondensadores

- Energia economizada com sistema de armazenamento baseado em supercondensador: 30 a 35%.
- Tracção sem abastecimento de linha em cerca de 400 m (apenas supercondensador).
- Tracção sem abastecimento de linha em cerca de 2000 m (supercondensador e bateria).
- A acumulação de energia para a travagem de cerca de 0,35 kWh, com V=50km/h.
- Diminuição do pico de carga e corrente de linha durante a tracção.
- Sistema de armazenamento diminui problemas com quebra da tensão de alimentação.
- Tempo de vida dos supercondensadores de cerca de 10^6 ciclos (15 anos).
- Tempo de vida da bateria aumentado em cerca de 25% (14000 ciclos em 2 anos).

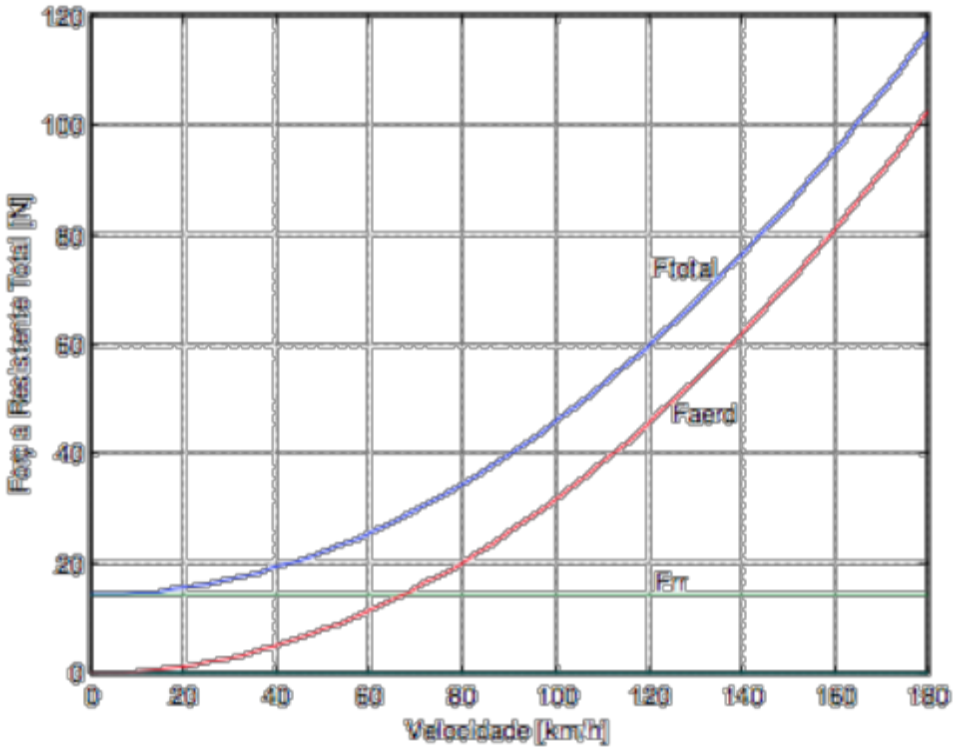
Modelo detalhado da dinâmica de um veículo ligeiro



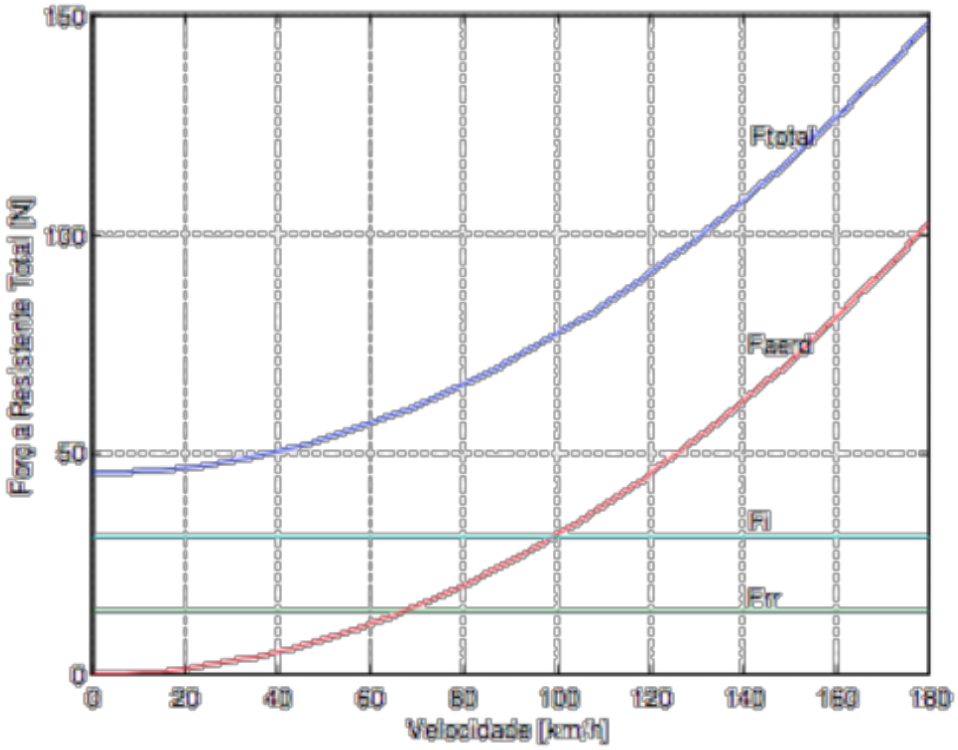
$$F_R = F_{RR} + F_{DA} + F_P$$

- F_X – forças de tracção
- F_{RR} – força de resistência ao rolamento dos pneus
- F_{DA} – força de resistência aerodinâmica
- F_P – força gravítica
- F_{DR} – força vertical traseira (drawbar load)

Modelo detalhado da dinâmica de um veículo ligeiro



$\theta = 0$



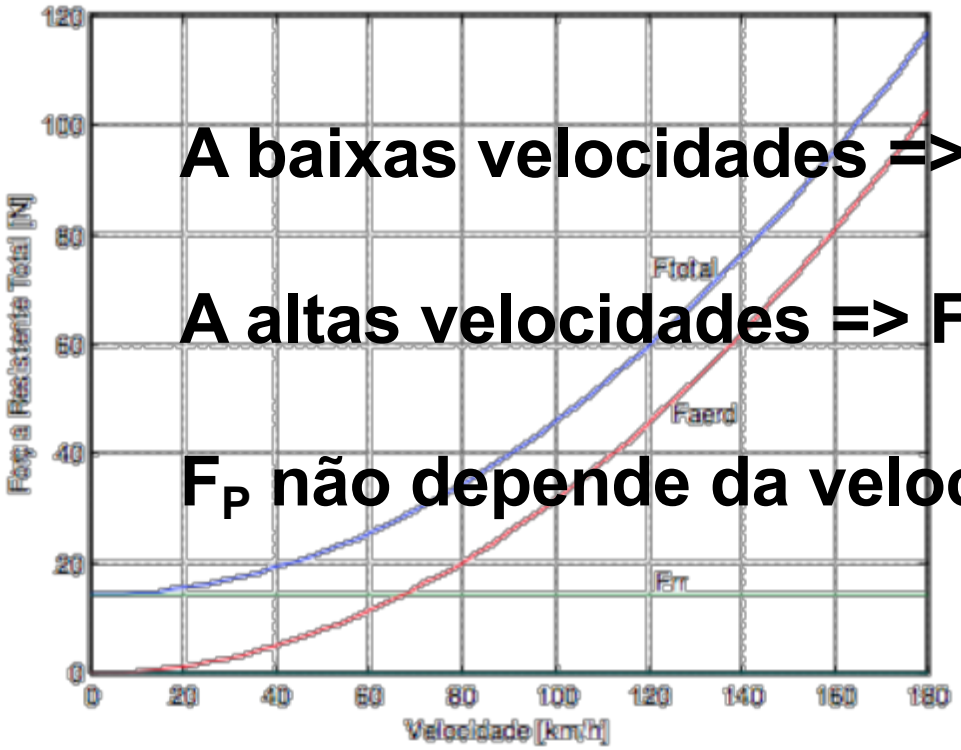
$\theta \neq 0$

Modelo detalhado da dinâmica de um veículo ligeiro

A baixas velocidades => F_{RR} é mais importante

A altas velocidades => F_{DA} é mais importante

F_P não depende da velocidade (pode ser negativa)



$\theta = 0$



$\theta \neq 0$

F_{RR} – força de resistência ao rolamento dos pneus

- A força de resistência ao rolamento dos pneus depende de:
  - Perda de energia devida a deflexões e diminuição da área de contacto
  - Atrito
  - Escorregamento
  - Deflexão da superficie do piso
  - Energia perdida nas lombas ou irregularidades do piso

$$F_{RR} = \sum_{i=1}^{4} F_{RRi}$$

F_{RRi} – força de resistência ao rolamento de cada roda

F_{RR} – força de resistência ao rolamento dos pneus

- Se:
  - Todas as rodas estiverem assentes no piso
  - Piso fôr idêntico
- Então:
  - Admite-se uma distribuição uniforme de peso

f_R – coeficiente de resistência ao rolamento do pneu

$$F_{RR} = f_{RRf} + f_{RRt} = f_R P = f_{RR} mg$$

F_{RR} – força de resistência ao rolamento dos pneus

f_R – coeficiente de resistência ao rolamento do pneu

Tipo de piso	f_R
Cimento	0,08 – 0,01
Asfalto	0,01 – 0,015
Calçada	0,033 – 0,055
Areia	0,15 – 0,3
Neve	0,025 – 0,037

F_{DA} – força de resistência aerodinâmica

$$F_{DA} = \frac{1}{2}\rho C_D A_f v_v^2$$

ρ – densidade do ar

C_D – coeficiente de resistência aerodinâmica

A_f – área frontal do veículo

v_v – velocidade do veículo relativa ao vento

A potência pedida ao motor varia com o cubo da velocidade…

F_{DA} – força de resistência aerodinâmica

$$\rho = 1,225\left(\frac{P_r}{101,325}\right)\left(\frac{288,16}{273,16+T_r}\right)$$

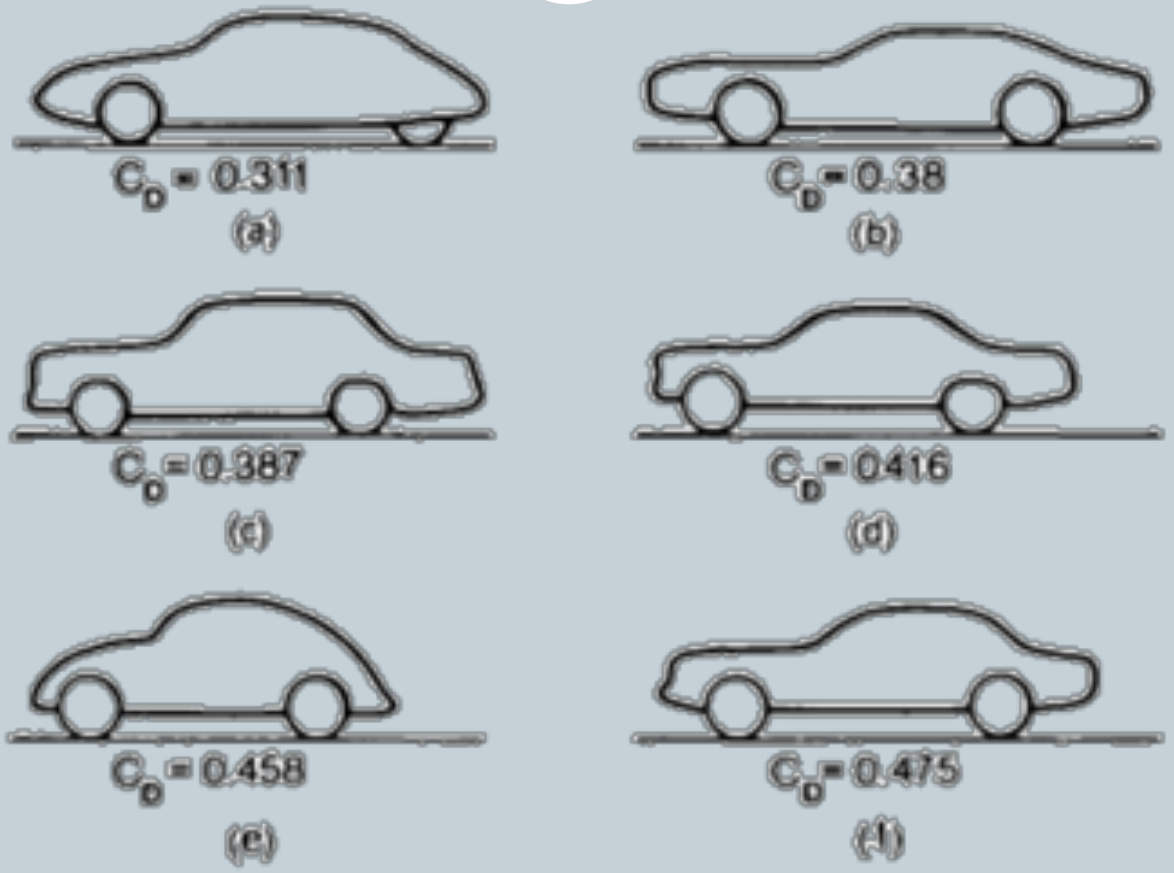
ρ – densidade do ar
P_r – pressão atmosférica (kPa)
T_r – temperatura do ar (ºC)

Para a generalidade dos veículos tem-se (m é a massa do veículo, em kg):

$$A_f = 1,6 + 0,00056(m - 765) \quad \left[m^2\right]$$

C_D também é conhecido por C_X, e obtem-se por ensaios em túneis de vento.

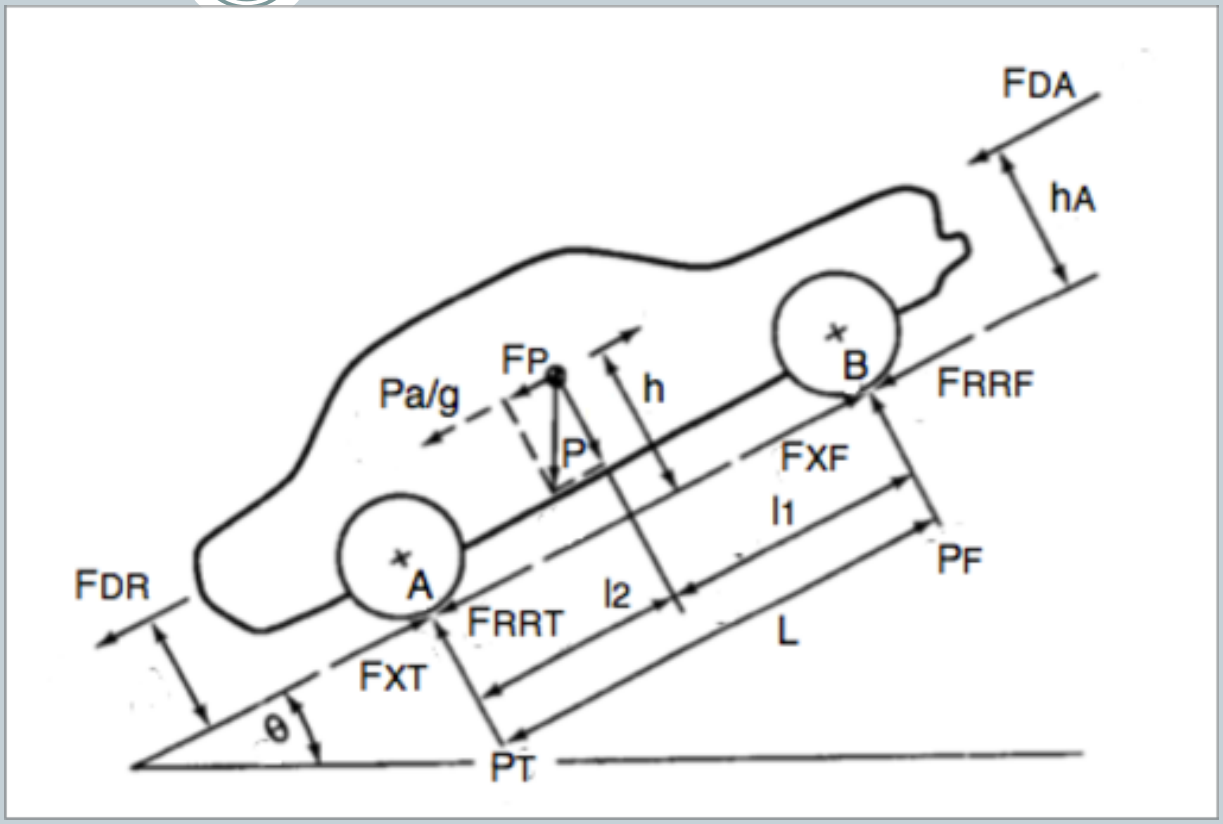
C_D – coeficiente de resistência aerodinâmica



Aerodynamic resistance coefficient for passenger cars. (a) Citroen DS 19. (b) Oldsmobile Toronado. (c) Mercedes-Benz 300 SE. (d) Ford Falcon Futura. (e) VW 1200. (f) Ford Mustang.

F_P – força gravítica

$$F_P = P\sin\theta = mg\sin\theta$$

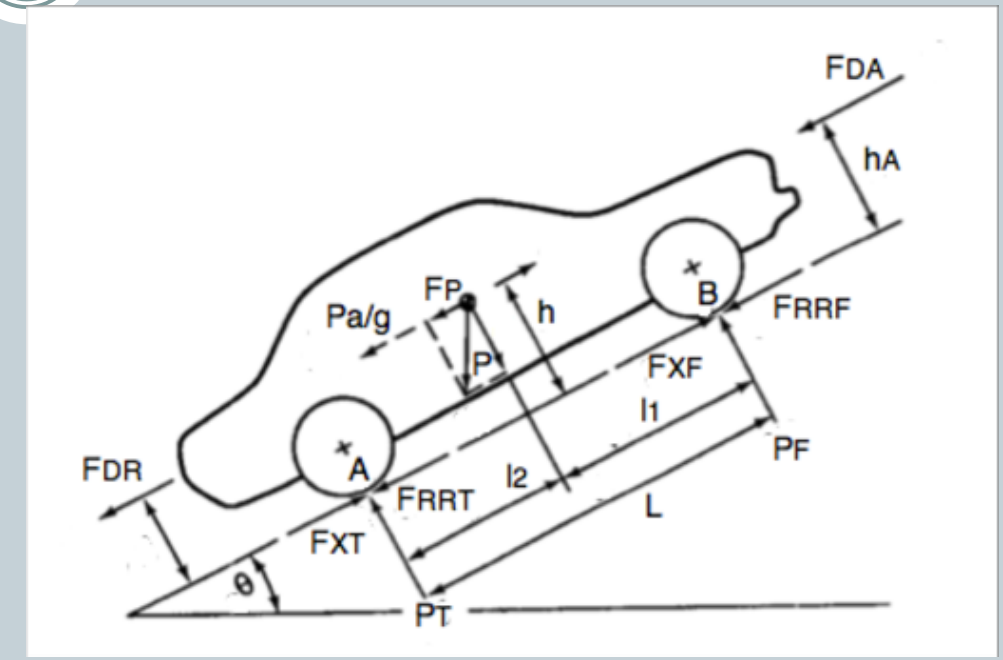


Resumindo:

$$F_R = f_R P + \frac{1}{2}\rho C_D A_f v_v^2 + P\sin\theta \quad (1)$$

Transferência de peso na aceleração

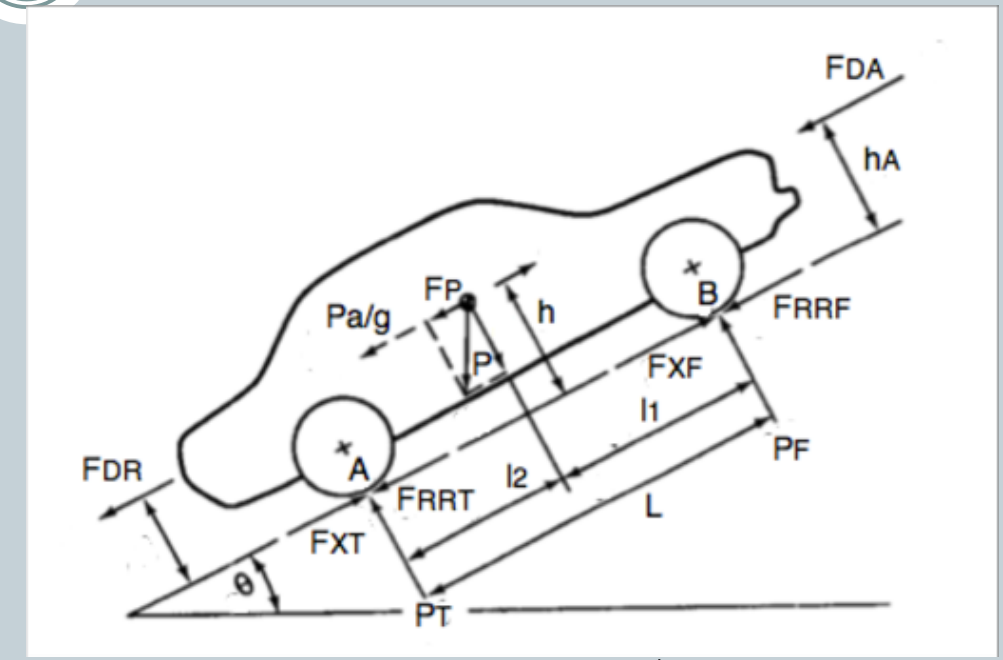
Força de tracção nas rodas dianteiras e traseiras (uma delas pode ser nula...)



$$m\frac{dx^2}{dt^2} = ma = \frac{Pa_x}{g} = F_{XF} + F_{XT} - F_{RRf} - F_{RRt} - F_{DA} - F_P - F_{DR}$$

Transferência de peso na aceleração

Introduzindo o conceito de Força de Inércia (aplicada no centro de massa), na equação anterior obtem-se $\Sigma F=0$.



$$F_{XF} + F_{XT} - \left(F_{RRf} + F_{RRt} + F_{DA} + F_P + F_{DR} + \frac{Pa}{g} \right) = 0$$

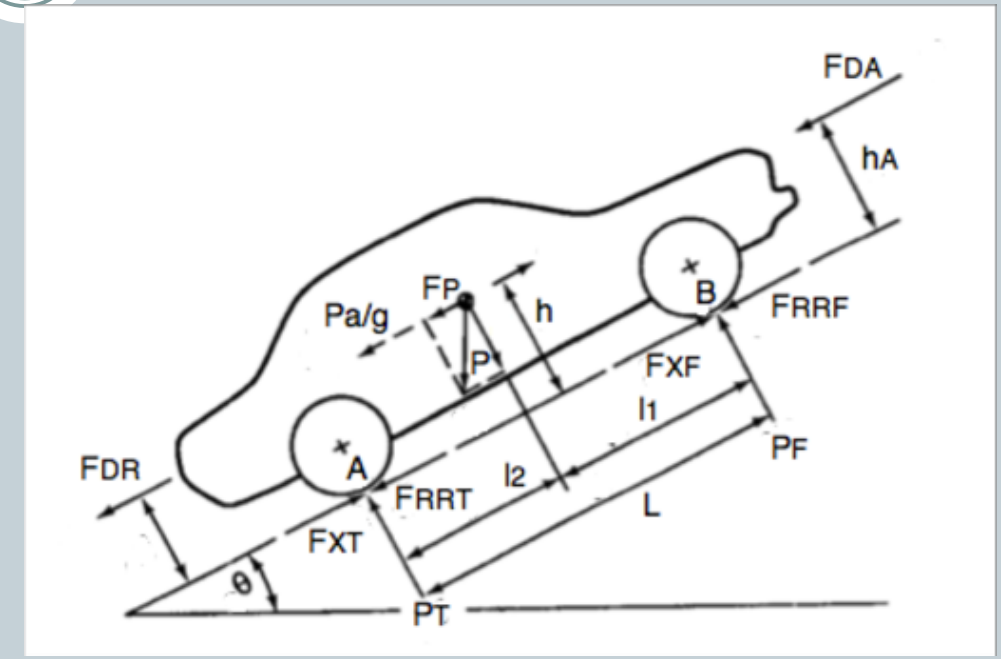
Força Motriz

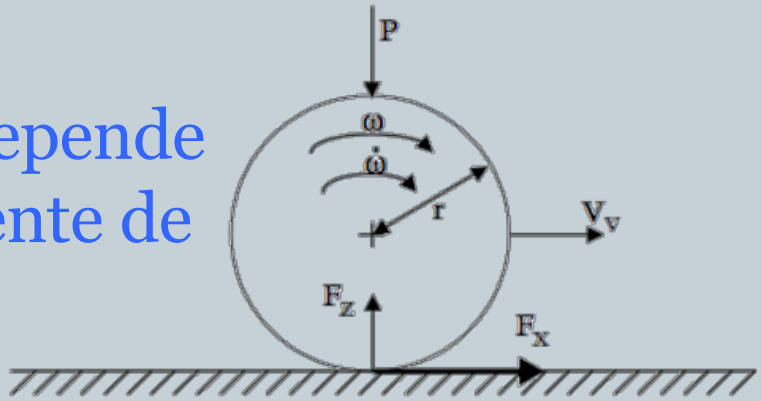
$$F_X = F_{RR} + F_{DA} + F_P + F_{DR} + \frac{Pa}{g} \quad (2)$$

Transferência de peso na aceleração

Para calcular o máximo de tracção em cada pneu é necessário determinar o peso em cada eixo. Estes podem ser calculados pela soma dos momentos nos pontos A e B.

A máxima tracção depende do peso e do coeficiente de aderência.

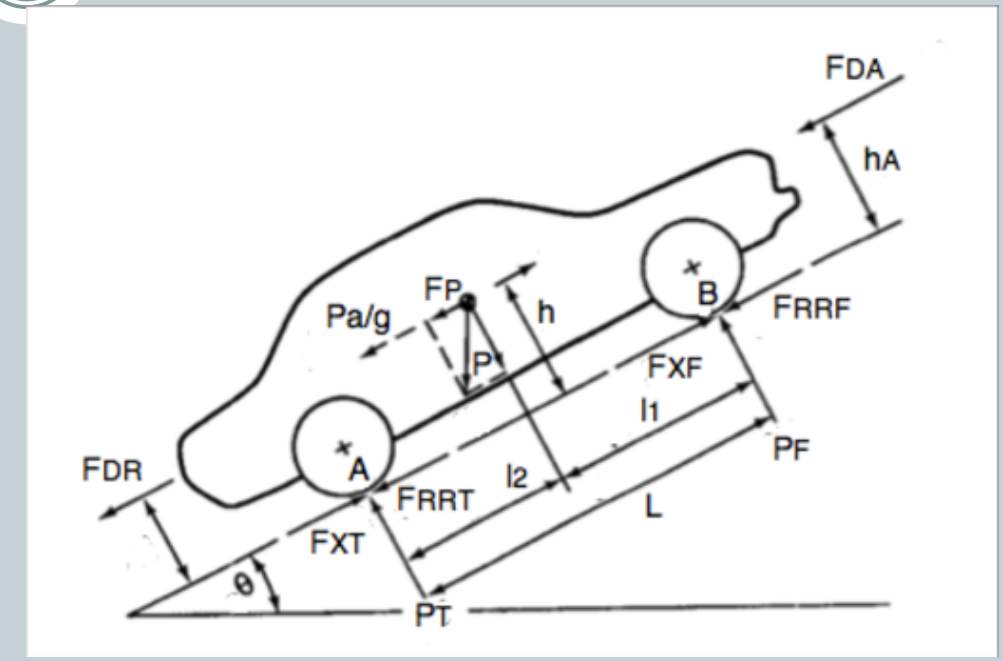




Transferência de peso na aceleração

Durante a aceleração, a transferência de peso faz-se do eixo da frente para o eixo da traseiro.

Considera-se equilíbrio dos momentos sobre o eixo da frente e traseiro no ponto de contacto pneu-estrada.

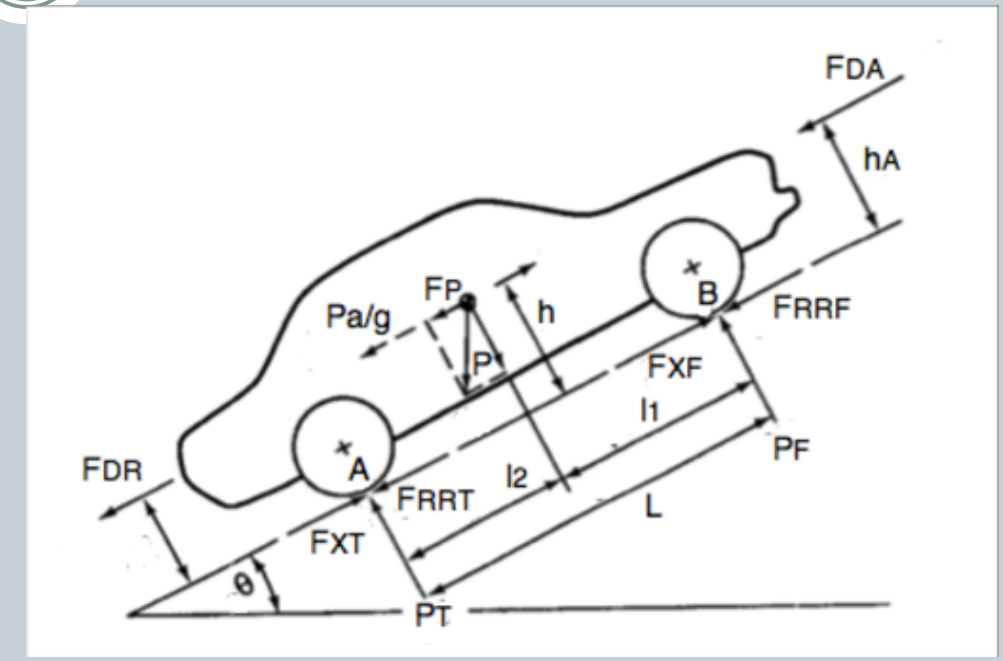


Sendo a soma dos momentos nula, no ponto A, tem-se:

$$-P_F L - F_{DA} h_a - F_{DR} h_d - \frac{Pa}{g} h + P \cos\theta \, l_2 \pm P \sin\theta \, h = 0$$

Transferência de peso na aceleração

O objectivo é obter o peso em cada eixo (pneu):



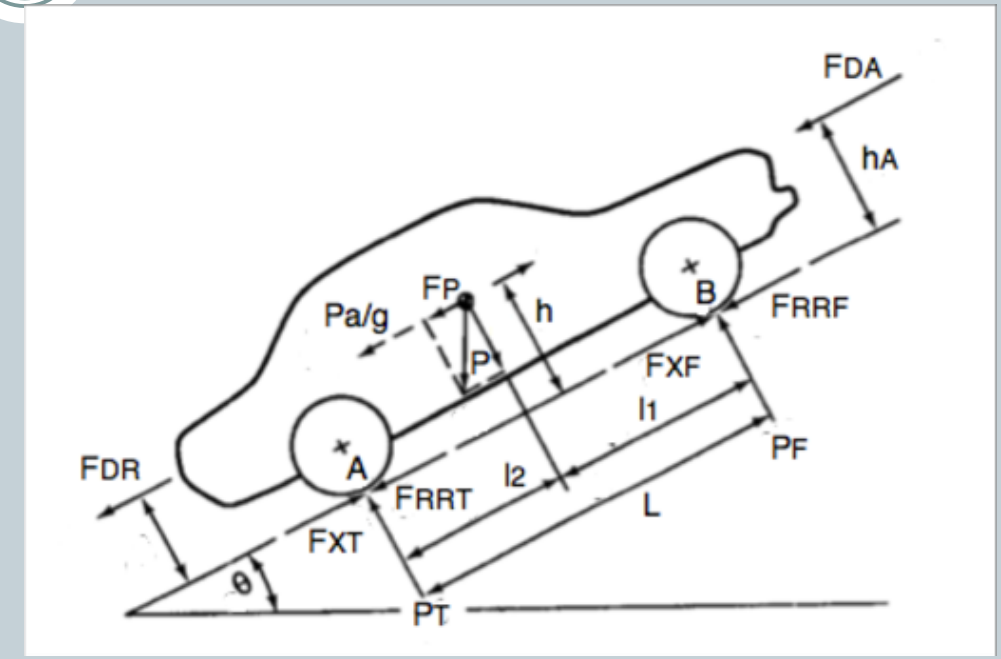
$$P_F = \frac{-F_{DA}h_a - F_{DR}h_d - \frac{Pa}{g}h + P\cos\theta\, l_2 \pm P\sin\theta\, h}{L}$$

Transferência de peso na aceleração

Para pequenos valores de inclinação (θ), tem-se que cos(θ)=1.

Por outro lado, para veículos normais de passageiros, tem-se h=ha=hd.

Logo:



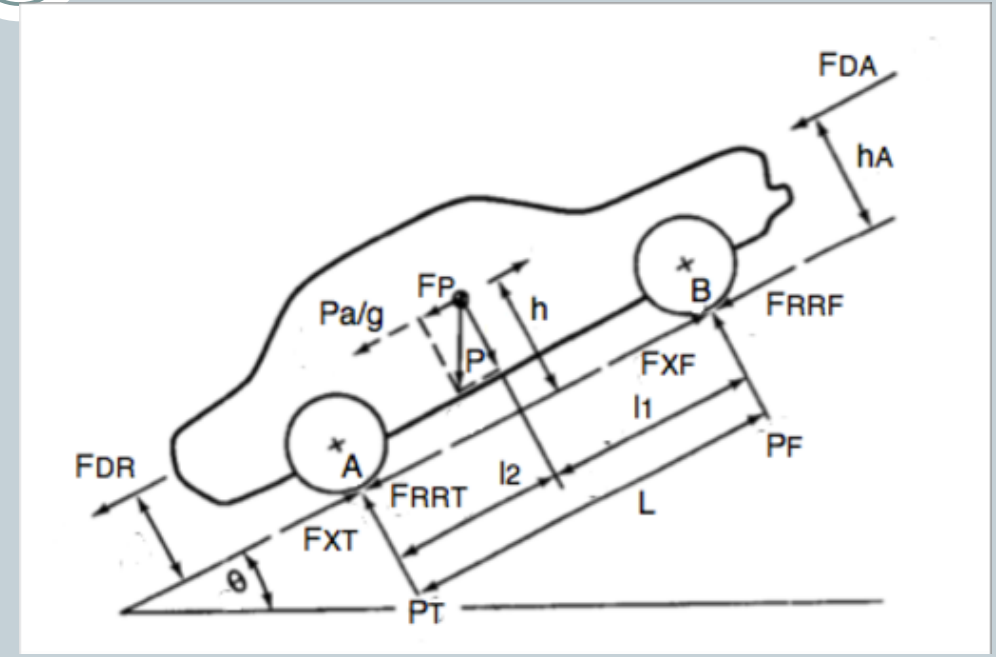
$$P_F = P\frac{l_2}{L} - \frac{h}{L}\left(F_{DA} + F_{DR} + \frac{Pa}{g} \pm P\sin\theta\right)$$

Transferência de peso na aceleração

Utilizando a eq. (2)

$$F_X = F_{RR} + F_{DA} + F_P + F_{DR} + \frac{Pa}{g} \quad (2)$$

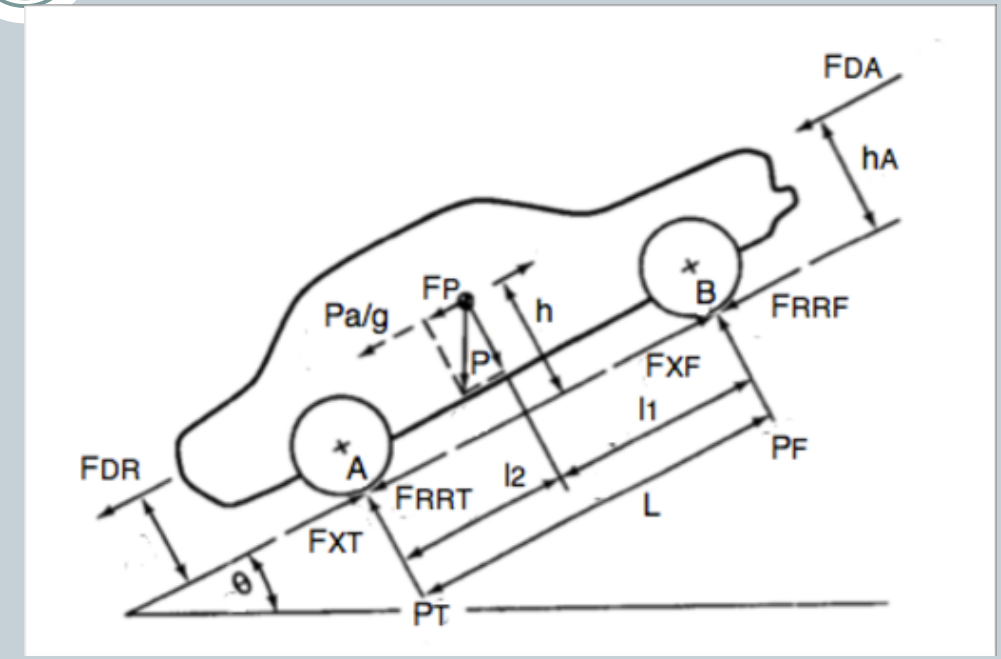
obtém-se, para o peso sobre as rodas do eixo dianteiro:



$$P_F = \underbrace{P\frac{l_2}{L}}_{\text{Carga estática no eixo ao nível do solo, em repouso}} - \underbrace{\frac{h}{L}\left(F_X - F_{RR}\right)}_{\text{Componente dinâmica da carga normal ou transferência de carga dinâmica}}$$

Transferência de peso na aceleração

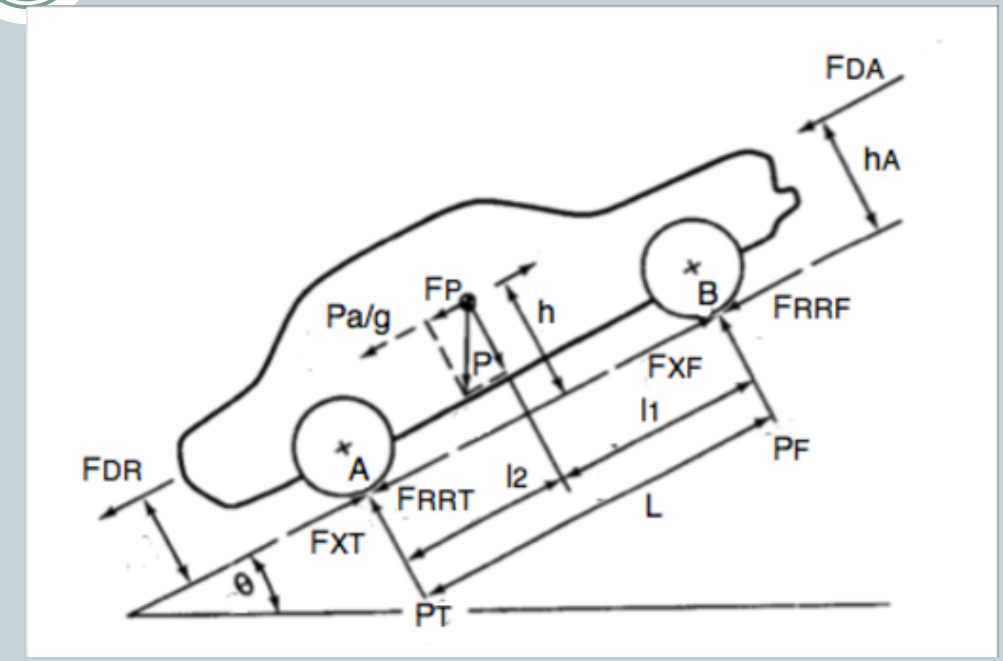
Utilizando o mesmo raciocínio para o ponto B, ontem-se o peso sobre as rodas do eixo traseiro.



$$P_T = \frac{+F_{DA}h_a + F_{DR}h_d + \frac{Pa}{g}h + P\cos\theta\, l_2 \pm P\sin\theta\, h}{L}$$

Transferência de peso na aceleração

Utilizando o mesmo raciocínio para o ponto B, ontem-se o peso sobre as rodas do eixo traseiro.

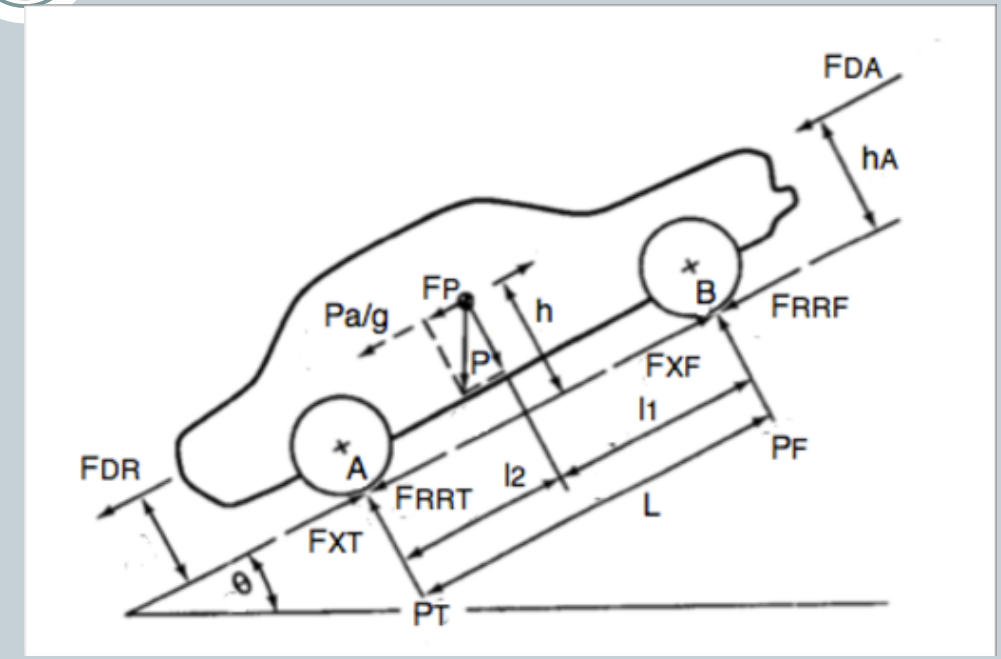


$$P_T = P\frac{l_1}{L} - \frac{h}{L}\left(F_X - F_{RR}\right)$$

Transferência de peso na aceleração

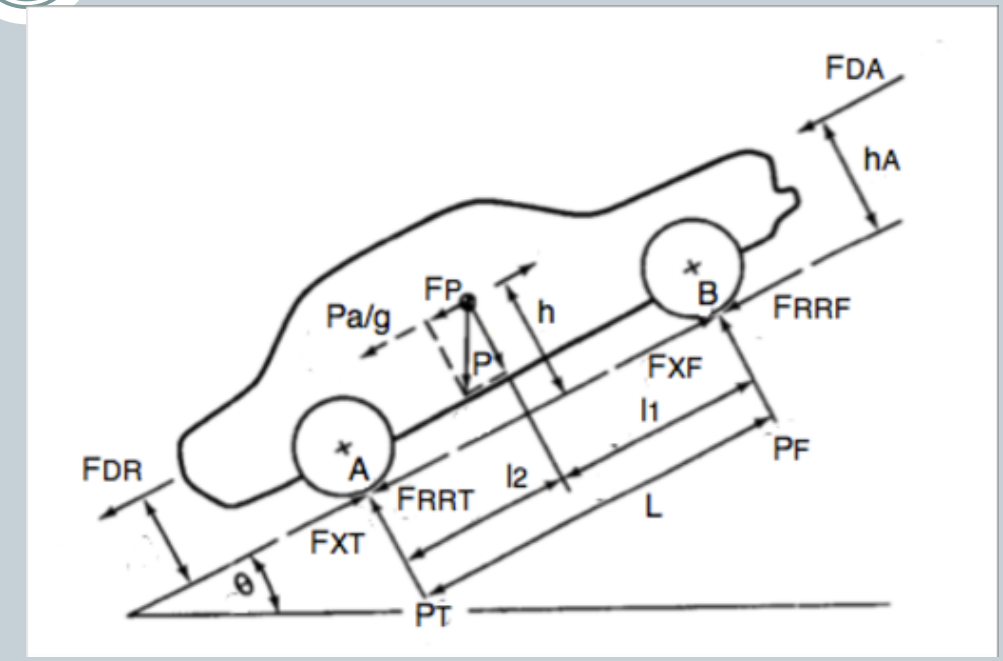
Existem dois factores que limitam o valor máximo da força de tracção:

- Peso em cada eixo e coeficiente de aderência
- Máximo binário disponível no motor



Transferência de peso na aceleração

O mesmo racicínio pode ser aplicado para a situação de travagem...

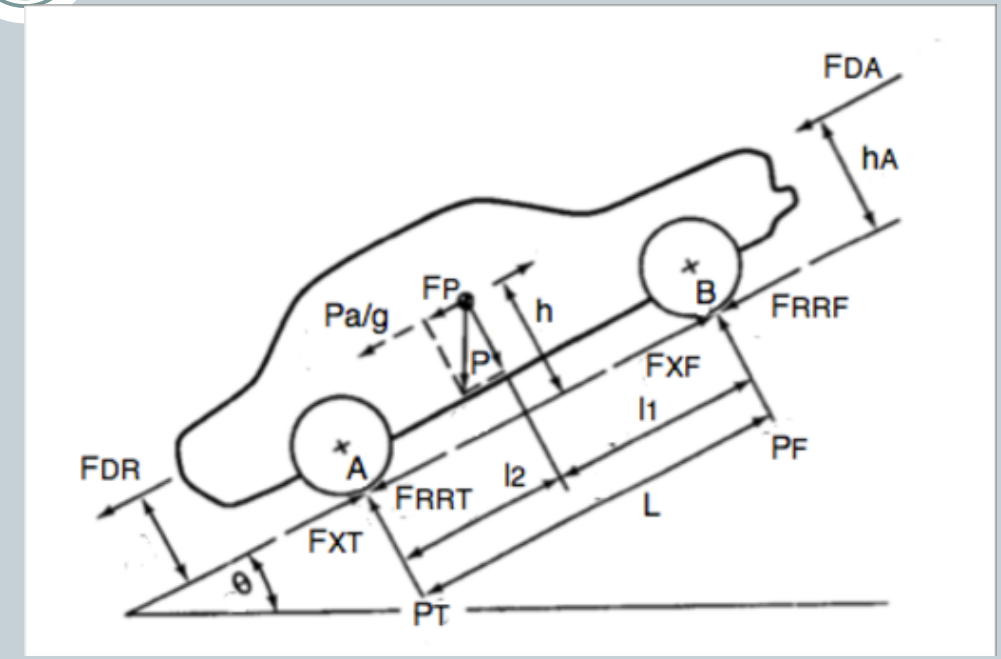


Transferência de peso na aceleração

Sabendo que a força máxima de tracção depende do peso e do coeficiente de aderência, e reintroduzindo

$$F_{RR} = f_R P$$

obtem-se para o eixo dianteiro (μ é o coeficiente de aderencia do pneu)



$$F_{\max} = \mu P_F = \mu\left(P\frac{l_2}{L} - \frac{h}{L}\left(F_{\max} - F_{RR}\right)\right) = \frac{\mu P\left(l_2 + f_R h\right)/L}{1 + \mu\frac{h}{L}}$$

Tempo e distância necessária para imobilizar o veículo

Adimta-se que a travagem se efectua com uma desaceleração constante, sendo que as forças se mantêm constantes durante o período de travagem

$$d = \frac{F_{res}}{m} = \frac{F_b + F_R}{m} = -\frac{dv}{dt}$$

Desaceleração

Se se pretender maior rigor, ter-se-ia de substituir m por $\xi P/g$

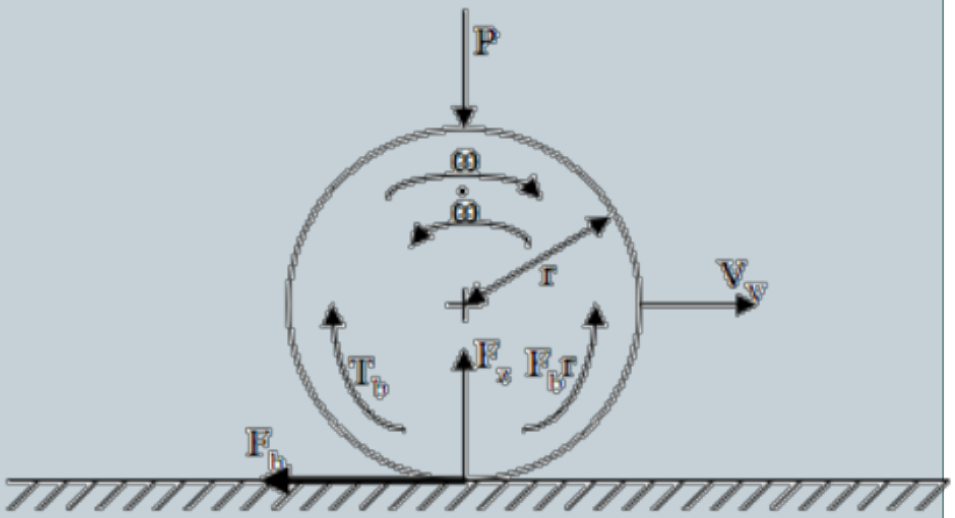
Onde ξ representa o factor de equivalência que tem em consideração os momentos de inércia dos elementos rotativos na travagem

Tempo e distância necessária para imobilizar o veículo

F_b representa a força de travagem desenvolvida no contacto pneu-piso (resulta do binário de travagem desenvolvido pelos travões)

$$F_b = \frac{T_b - J_w \dot{\omega}}{r}$$

Notar que o raio poderá variar durante a travagem…



F_R representa o somatório das restantes forças envolvidas – ver eq. (1)

$$F_R = f_R P \cos\theta + \frac{1}{2}\rho C_D A_f v_v^2 \pm P \sin\theta$$

Tempo e distância necessária para imobilizar o veículo

$$\frac{F_{res}}{m} = -\frac{dv_v}{dt}$$

$$dv_v = -\frac{F_{res}}{m}dt$$

$$\int_{v_{vi}}^{0} dv_v = -\frac{F_{res}}{m}\int_{0}^{t_f} dt$$

Tempo necessário para imobilizar o veículo

$$t_f = -\frac{m(0 - v_{vi})}{F_{res}} = \frac{mv_{vi}}{F_b + f_R P\cos\theta + \frac{1}{2}\rho C_D A_f v_v^2 \pm P\sin\theta}$$

Tempo e distância necessária para imobilizar o veículo

$$d = \frac{F_{res}}{m} = -\frac{dv_v}{dt} = -v\frac{dv}{dx}$$

$$\frac{F_{res}}{m} = -v\frac{dv}{dx}$$

$$dx = -\frac{mv}{F_{res}dv}$$

$$\int_0^x dx = -m\int_{v_{vi}}^0 \frac{v}{F_{res}}dv$$

$$x = -m\int_{v_{vi}}^0 \frac{v}{F_b + f_R P\cos\theta + \frac{1}{2}\rho C_D A_f v_v^2 \pm P\sin\theta}dv$$

$$x = \frac{m}{\rho C_D A_f v_{vi}^2}\ln\left(1 + \frac{\frac{1}{2}\rho C_D A_f v_{vi}^2}{F_b + f_R P\cos\theta \pm P\sin\theta}\right)$$

Distância de travagem

Distância necessária para imobilizar o veículo e eficiência de travagem

Define-se **eficiência de travagem** como a relação entre a máxima taxa de desaceleração em unidades g (a/g) que se pode atingir antes dos pneus do veículo atingirem o coeficiente de aderência do piso.

$$\eta_b = \frac{a/g}{\mu}$$

Distância necessária para imobilizar o veículo e eficiência de travagem

A eficiência de travagem indica até que ponto o veículo utiliza o coeficiente de aderência do piso na travagem.

Caso $\eta_b<1$, a desaceleração será menor do que aquela que se poderia atingir e o veículo terá uma maior distância de travagem

$$\eta_b = \frac{a/g}{\mu}$$

Distância necessária para imobilizar o veículo e eficiência de travagem

Se a travagem se processar de tal forma que as máximas forças de travagem dianteira e traseira seja simultaneas, a eficiência da travagem será η_b=100% e a distância de travagem mínima.

Neste caso F_b=μP, e distância mínima será dada por

$$x_{\min} = \frac{m}{\rho C_D A_f v_{vi}^2} \ln\left(1 + \frac{\frac{1}{2}\rho C_D A_f v_{vi}^2}{\mu P + f_R P \cos\theta \pm P \sin\theta}\right)$$

Distância necessária para imobilizar o veículo e eficiência de travagem

Caso a eficiência da travagem seja η_b<100% (a máxima taxa de desaceleração, em unidades g, será atingida antes dos pneus do veículo terem atingido o coeficiente de aderência do piso), a distância de travagem será maior

$$x_{\min} = \frac{m}{\rho C_D A_f v_{vi}^2} \ln\left(1 + \frac{\frac{1}{2}\rho C_D A_f v_{vi}^2}{\eta_b \mu P + f_R P \cos\theta \pm P \sin\theta}\right)$$

Distância necessária para imobilizar o veículo e eficiência de travagem

