

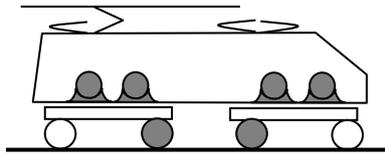
# **TRACÇÃO ELÉTRICA (MIEEC)**

## **PROBLEMAS SELECIONADOS (2018/2019)**

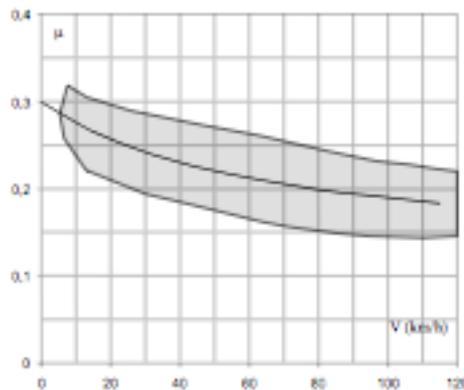
**João Martins**  
**DEE – FCT/UNL**  
(jf.martins@fct.unl.pt)

## Problema 1.

Numa via férrea foram feitos ensaios de aderência, obtendo-se um conjunto de pares de valores de "coeficiente de aderência - velocidade", que definem a zona sombreada no gráfico da figura ao lado. A linha média dessa zona, prolongada até  $v=0$ , cruza o eixo vertical em  $\mu = \mu_0 = 0,3$ .



Considere uma locomotiva de 80 toneladas, com dois eixos motores e mais dois eixos não motores. As rodas têm 1000 mm de diâmetro. Cada eixo motor é accionado por dois motores, através de caixas de redução de factor 1:3.



1. Para que não haja patinagem no arranque, determine o máximo *esforço de tracção*  $F_{\text{IMAX}}$  em cada eixo motor.
2. Sem patinagem, determine o binário máximo aplicável no arranque por cada eixo motor.
3. Determine o binário máximo desenvolvido por cada motor, sem patinagem no arranque.
4. Determine o máximo *esforço de tracção DA LOCOMOTIVA* no arranque, sem patinagem.
5. Se a locomotiva puxar um comboio de massa total 600 toneladas, e se as condições anteriores se mantiverem durante 10 segundos, ao fim desses 10s quanto será a velocidade do comboio?
6. Verifica-se que, em recta plana e com velocidade estabilizada, a resistência ao movimento da composição (por tonelada) é dada por  $R = 15 + 0,044.v + (1/440).v^2$ , com  $R$  em N/t e  $v$  em km/h. Calcule a potência necessária NA LOCOMOTIVA para manter a composição rodando a 100 km/h.
7. Determine a potência necessária NA LOCOMOTIVA para manter a composição rodando a 100 km/h como na alínea anterior, mas subindo uma rampa de 2 ‰ em recta.
8. Determine a potência necessária NA LOCOMOTIVA para manter a composição rodando a 100 km/h como na alínea 6), mas descendo uma pendente de 1 ‰ e em curva de raio igual a 800m (bitola da via  $b \approx 1,6$ m).
9. Considere que a locomotiva circula a 80km/h, puxando o citado comboio. Os travões actuam todas as rodas da locomotiva, mas não as das carruagens. Determine o espaço necessário para travar em segurança.
10. Diga como classifica esta locomotiva, quanto ao seu rodado.

## Problema 2.

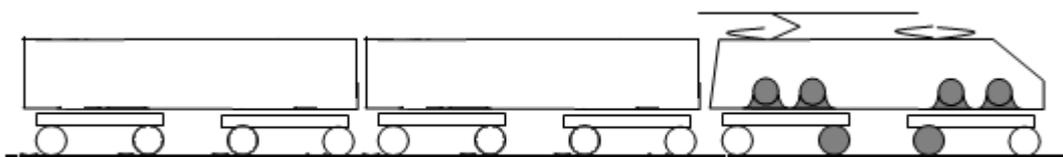
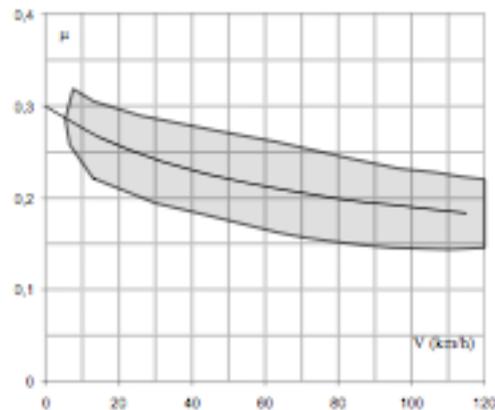
Considere uma pequena linha de caminho de ferro com as seguintes características:

- 20 km de comprimento;
- Alimentação a 1500 Vdc;
- Alimentada por uma única subestação numa das extremidades;
- Catenária em cobre com 400 mm<sup>2</sup> de secção;
- Carris de 50 kg/m.

A composição que circula nesta linha tem as seguintes características:

- Peso total de 80 toneladas;
- Rodas de 1000 mm de diâmetro;
- Caixas reductoras de velocidade com relação 1:3;
- Motores DC de 100kW.

A figura seguinte corresponde ao conjunto de valores coeficiente de aderência em função da velocidade.



- Admitindo a circulação de uma única composição absorvendo a sua corrente nominal, determine o valor da tensão na extremidade da linha oposta à subestação.
- Classifique a locomotiva quanto aos eixos tractores.
- Determine o binário máximo desenvolvido por cada motor no arranque, sem patinagem.
- Considere que a locomotiva circula a 80km/h. Determine o espaço necessário para travar em segurança.

### Problema 3.

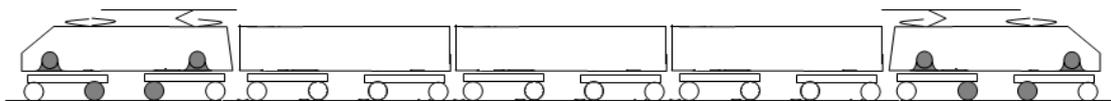
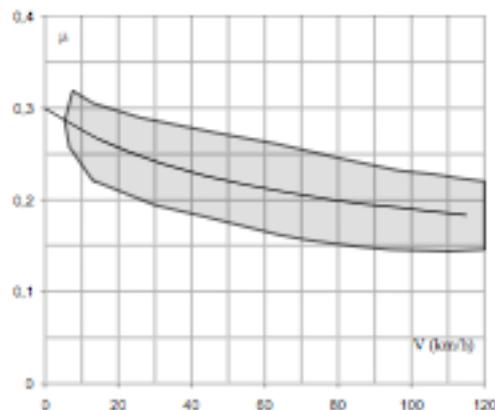
Considere uma pequena linha de caminho de ferro com as seguintes características:

- 20 km de comprimento;
- Alimentação a 1500 Vdc;
- Alimentada por duas subestações, uma em cada extremidade da linha;
- Catenária em cobre com 400 mm<sup>2</sup> de secção;
- Carris de 50 kg/m.

A composição que circula nesta linha tem as seguintes características:

- Peso total de 80 toneladas;
- Rodas de 1000 mm de diâmetro;
- Caixas reductoras de velocidade com relação 1:3;
- Motores DC de 200kW.

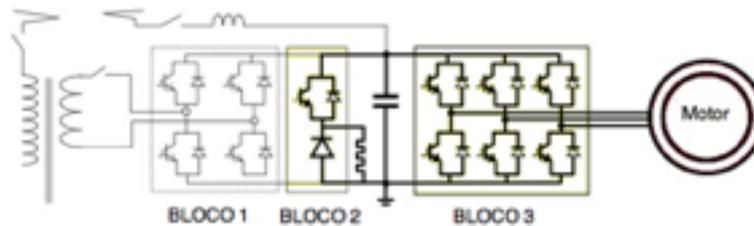
A figura seguinte corresponde ao conjunto de valores coeficiente de aderência em função da velocidade.



- Admitindo a circulação de uma única composição absorvendo a sua corrente nominal, determine o valor da tensão a meio da linha.
- Classifique as locomotivas quanto aos eixos tractores.
- Determine o binário máximo desenvolvido por cada motor no arranque, sem patinagem.
- Considere que a composição circula a 80km/h. Determine o espaço necessário para travar em segurança.

## Problema 4.

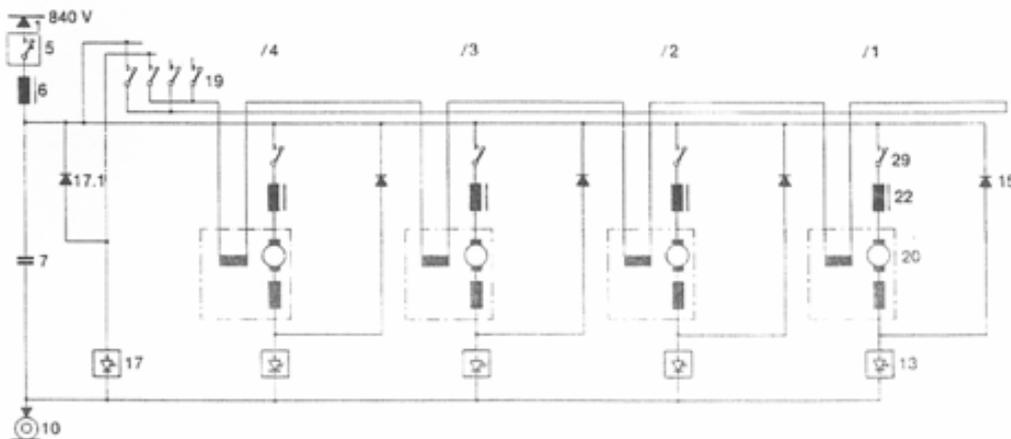
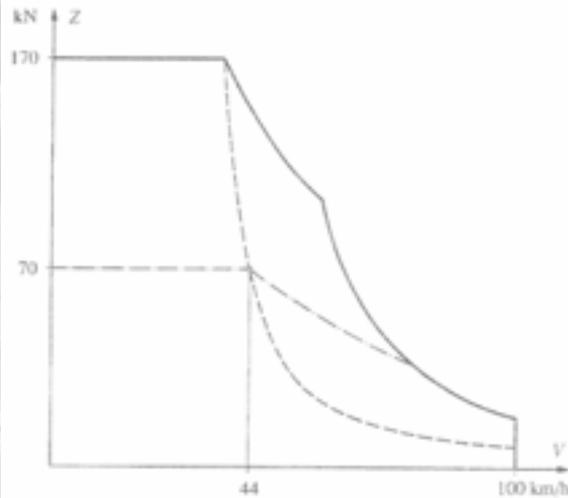
Considere uma locomotiva (Bo'Bo') com as seguintes características principais: Velocidade máxima = 140 km/h; Peso = 90 ton; Potência máxima = 4167 kW; Potência máxima por motor = 1050 kW; 1 conversor electrónico de potência por motor; Alimentação = 25 kV (50 Hz) ou 1,5 kV (DC); Força máxima no arranque = 320 kN; Força máxima em regime nominal=250kN (a 60km/h); Força máxima à velocidade máxima = 110 kN; Distância de travagem na horizontal (a 140 km/h) = 970 m; Secção transversal = 12 m<sup>2</sup>.



- Determine a potência de tracção necessária, que a locomotiva tem de dispender, para rebocar 8 vagões (quatro eixos, 42 ton e 12 m<sup>2</sup> de área frontal cada), a uma velocidade de 100 km/h em linha recta e plano horizontal. Utilize as fórmulas de Davis.
- Determine o rendimento da transmissão mecânica (arredondado às unidades).
- Admita os seguintes rendimentos: blocos electrónicos de potência (98% cada), transformador de potência (98%) e motores de tracção (97%). Determine a corrente pedida ao fio de contacto, em condições de potência máxima, em ambas as situações de alimentação (DC e AC monofásico). Admita um factor de potência de 0,85.
- Considere agora que a locomotiva circula sozinha, numa via simples, alimentada a 1500 Vdc, com secção do fio de contacto igual a 400 mm<sup>2</sup> e carris de 50kg/m, no troço entre duas sub-estações A e B (que distam entre si 10 km), no sentido A->B.
- Determine a queda de tensão média, para uma corrente pedida ao fio de contacto de 2 kA.
- Admita que a 4 km da sub-estação A a locomotiva desenvolve uma potência mecânica igual a 2000 kW. Admitindo os rendimentos anteriores, determine a tensão de alimentação nesse ponto.
- Nas condições da alínea anterior determine a potência entregue por cada uma das sub-estações (A e B).
- Considere agora que a locomotiva circula no sentido A->B, e que a subestação B se encontra em manutenção. Nestas condições a locomotiva ficará sujeita a uma limitação de potência. Identifique o ponto do troço A-B onde essa limitação será maior. Considerando o mínimo de tensão de funcionamento admissível - 1000 Vdc, determine a potência mecânica máxima que a locomotiva pode desenvolver nesse ponto de maior limitação.

## Problema 5.

Considere uma locomotiva BoBo, com 48,5 toneladas, a potência mecânica de cada motor vale 250 kW, a relação de transmissão mecânica 1:6, a secção frontal 12m<sup>2</sup> e o diâmetro de cada roda 1035 mm. Todos as figuras seguintes se referem a esta locomotiva. Esta locomotiva reboca 10 vagões de 20 toneladas cada um. Note que a potência mecânica nominal da locomotiva corresponde ao ponto (70kN;44km/h).



- Admita que se pretende arrancar a locomotiva numa rampa ascendente (com inclinação 15°). Determine o coeficiente de aderência limite.
- Identifique o tipo de ligação utilizada nos motores.
- Identifique o tipo de conversor electrónico de potência utilizado para alimentar cada um dos motores.
- Determine o rendimento da transmissão mecânica.
- Admita que a locomotiva está a desenvolver a força nominal (70 kN) a uma velocidade de 22 km/h. Qual o binário mecânico desenvolvido por cada motor.
- Se nas condições da alínea anterior cada motor consumir uma corrente de 250 A, determine a tensão de alimentação aproximada, de cada motor (despreze a queda de tensão na alimentação).
- Nas condições da alínea anterior determine a razão cíclica de cada conversor electrónico de potência que alimenta cada motor.

## Problema 6.

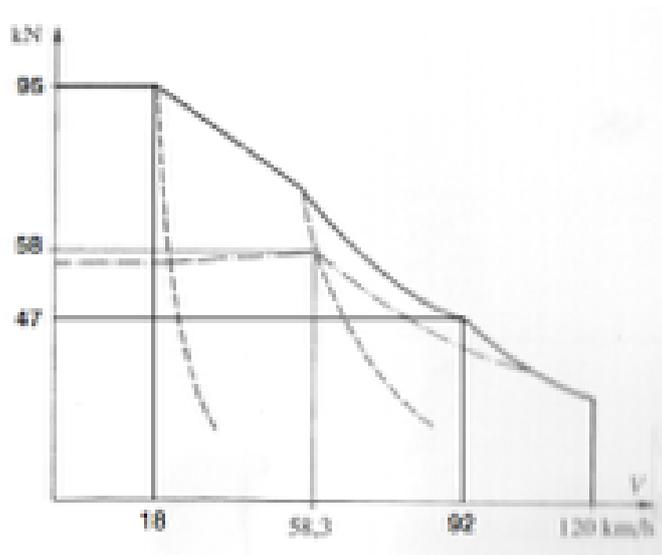
Considere uma locomotiva com 87 toneladas, a potência eléctrica de cada motor vale 250 kW, a relação de transmissão mecânica 1:3,52 e a secção frontal 12m<sup>2</sup>.

Considere uma linha com alimentação DC (3000 V), em que cada troço de 60 km é alimentado por duas sub-estações nas extremidades (com ligação paralela na meia distância), e com uma resistência kilométrica de 0,065 Ω/km. Notar que numa linha alimentada a 3000 Vdc o mínimo de tensão admissível é 2000 Vdc.

Em cálculos onde se considere o comboio no seu todo, considere para a massa total corrigida devida às massas inerciais o coeficiente  $\xi=1,1$ .

O coeficiente de aderência é dado pela seguinte fórmula (com v em km/h):

$$m = \frac{k + 0,034v}{46 + 0,2v}$$



- Determine o rendimento do conjunto motor/transmissão mecânica.
- Classifique a locomotiva, quanto aos seus eixos.
- Admita que à locomotiva estão acoplados um conjunto de vagões de 20 tonelada cada (2 eixos) e secção frontal de 12m<sup>2</sup>. Admitindo condições de regime permanente, qual o numero máximo de vagões que podem ser rebocados à velocidade de 92 km/h.
- Nas condições de esforço máximo e para uma velocidade de 18 km/h, determine a corrente eléctrica pedida ao fio de contacto. Despreze as perdas electrónicas e admita rendimentos constantes.
- Sabe-se que, no arranque da locomotiva sozinha, ao aplicar a força de tracção máxima a mesma se encontra no limite da aderência. Determine a constante k na fórmula do coeficiente de aderência.
- Considere que o comboio se desloca a uma velocidade de 60 km/h não rebocando nenhum vagão. Aplicando a força máxima de travagem possível (evitando patinagem) determine o espaço necessário para a composição parar.
- Considerando que um comboio rebocado pela locomotiva circula num dos troços da linha. Verifique se a locomotiva está sujeita a restrições de potência no referido troço.

## Problema 7.

A locomotiva Alstom BB 27000 (Bo'Bo') entrou ao serviço em 2001 e tem as seguintes características principais:

Velocidade máxima = 140 km/h

Peso = 90 ton

Potência máxima = 4167 kW

Potência máxima por motor = 1050 kW

1 conversor electrónico de potência por motor

Alimentação = 25 kV (50 Hz) ou 1,5 kV (DC)

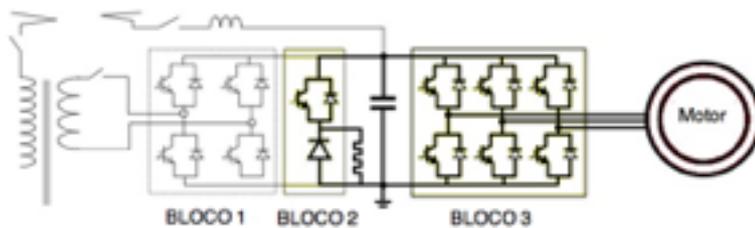
Secção transversal = 12 m<sup>2</sup>

Força máxima no arranque = 320 kN

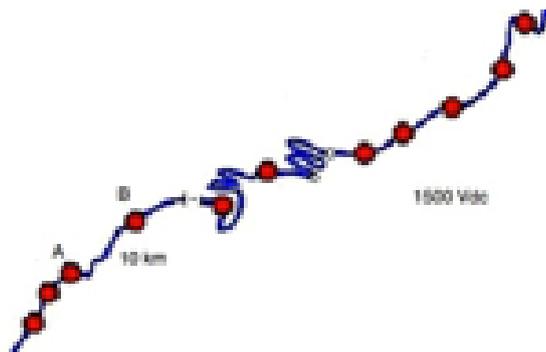
Força máxima em regime nominal = 250 kN (a 60 km/h)

Força máxima à velocidade máxima = 110 kN

Distância de travagem na horizontal (a 140 km/h) = 970 m



- Identifique cada um dos blocos (1, 2 e 3) no esquema do conversor electrónico de cada motor e explique quais as respectivas funções.
- Determine a potência de tracção necessária, que a locomotiva tem de dispender, para rebocar 8 vagões (quatro eixos, 42 ton e 12 m<sup>2</sup> de área frontal cada), a uma velocidade de 100 km/h em linha recta e plano horizontal. Utilize as fórmulas de Davis.
- Determine o rendimento da transmissão mecânica (arredondado às unidades).
- Admita os seguintes rendimentos: blocos electrónicos de potência (98% cada), transformador de potência (98%) e motores de tracção (97%). Determine a corrente pedida ao fio de contacto, em condições de potência máxima, em ambas as situações de alimentação (DC e AC monofásico). Admita um factor de potência de 0,85.
- Considere agora que a locomotiva circula sozinha, numa via simples, alimentada a 1500 Vdc, com secção do fio de contacto igual a 400 mm<sup>2</sup> e carris de 50kg/m, no troço entre duas sub-estações A e B (que distam entre si 10 km), no sentido A->B.

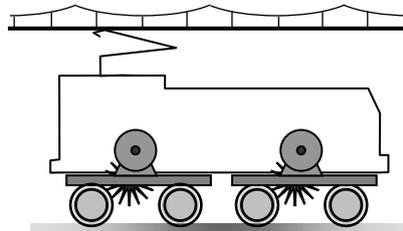


- Determine a queda de tensão média, para uma corrente pedida ao fio de contacto de 2 kA.
- Admita que a 4 km da sub-estação A a locomotiva desenvolve uma potência mecânica igual a 2000 kW. Admitindo os rendimentos anteriores, determine a tensão de alimentação nesse ponto.
- Nas condições da alínea anterior determine a potência entregue por cada uma das sub-estações (A e B).
- Considere agora que a locomotiva circula no sentido A->B, e que a subestação B se encontra em manutenção. Nestas condições a locomotiva ficará sujeita a uma limitação de potência. Identifique o ponto do troço A-B onde essa limitação será maior. Considerando o mínimo de tensão de funcionamento admissível - 1000 Vdc, determine a potência mecânica máxima que a locomotiva pode desenvolver nesse ponto de maior limitação.

## Problema 8.

Uma locomotiva BB 16 500 de 70t tem dois bogies monomotores. A locomotiva usa dois tipos de transmissão, com relações de transmissão diferentes:

- Em serviço de passageiros: relação  $k_1 = 1: 1,88$
  - Em serviço de mercadorias: relação  $k_2 = 1: 3,217$
1. Calcule as massas fictícias equivalentes às massas rotativas, e a massa de inércia total equivalente da locomotiva, para os dois tipos de serviço, dado que:
    - Para cada eixo, o momento de inércia do eixo e dos órgãos a ele directamente ligados é igual a  $I_1=314 \text{ Kg.m}^2$ .
    - Para cada motor, o momento de inércia do motor e órgãos a ele ligados é  $I_2=232 \text{ Kg.m}^2$ .
    - As rodas, com meio uso, têm raio  $R=0,53\text{m}$ .
  2. Como classificaria a locomotiva quanto aos seus eixos.



## Problema 9.

Um motor de corrente contínua de excitação em série acciona um veículo eléctrico e cujo esquema de ligações está representado na figura 22. O motor tem as seguintes características:

$$P_{mec} = 80 \text{ CV}$$

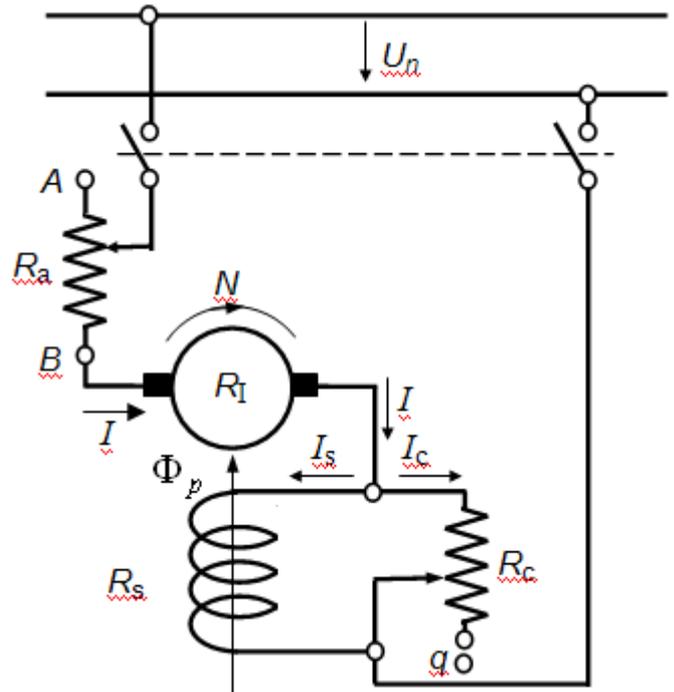
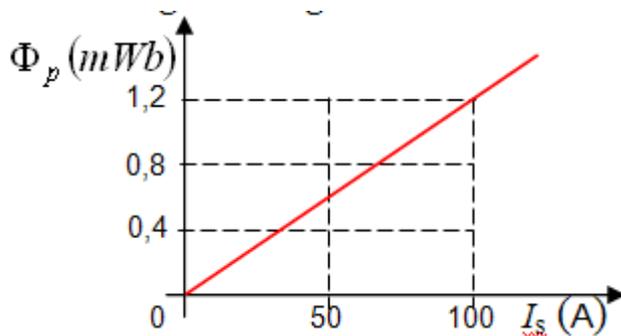
$$U_n = 1500 \text{ V (tensão da linha do Estoril)}$$

$$R_l = 0,2 \text{ W}$$

$$R_s = 0,3 \text{ W}$$

$$K = (p/c) z = 200 \text{ (constante construtiva)}$$

É conhecida a característica de magnetização que se considera linear, cujo andamento está indicado no gráfico seguinte.



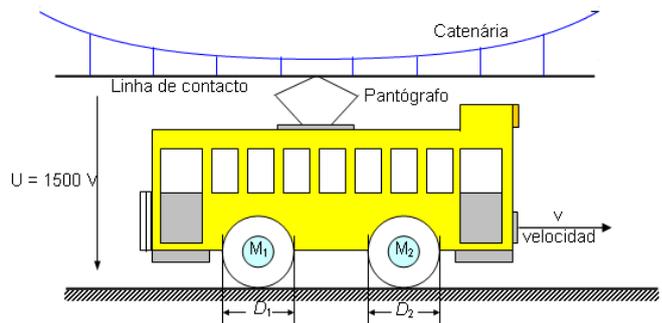
Determinar:

1. Calcular a corrente nominal ou estipulada  $I_n$  absorvida pelo motor, sabendo que o rendimento nominal é de  $\eta_n = 78,4 \%$  e o reóstato de arranque  $R_a$  está todo retirado.
2. Calcular a resistência de arranque  $R_a$  para que a sobreintensidade de arranque  $I_a/I_n$  não ultrapasse 1,25. Supor que o reóstato de campo  $R_c$  está no ponto q, isto é, está fora de serviço.
3. Qual a força  $F$  de contacto roda/carril em kg que o motor produz no arranque em cada roda se ele traccionar duas rodas com um raio  $R = 0,5 \text{ m}$  cada.
4. Calcular as perdas por efeito de Joule no instante de arranque para as condições de b). Justificar onde deve estar o cursor de  $R_a$  em condições normais de funcionamento do motor.
5. Com o reóstato de arranque  $R_a$  colocado em B e o reóstato de campo  $R_c$  colocado em q (desligado), calcular a velocidade  $N$  em rpm e o binário  $T$  em mkg do motor em regime nominal ( $1\text{kg}_f = 9,8 \text{ N}$ ).
6. Pretende-se aumentar a velocidade do motor e manter o binário anterior determinado em e) por actuação do reóstato  $R_c$ . Para  $R_c = 0,5 \Omega$  calcular a corrente absorvida  $I$  e a velocidade  $N$  do motor.
7. O veículo entra numa zona de derrapagem de forma que o binário  $T_o$  pedido ao motor é cerca de 4 % do binário nominal  $T_n$ . Mantendo a tensão nominal  $U_n$  aplicada e  $R_c$  retirado, qual a velocidade  $N_o$  de embalamento do motor. Como poderia o veículo ser retirado desta situação?

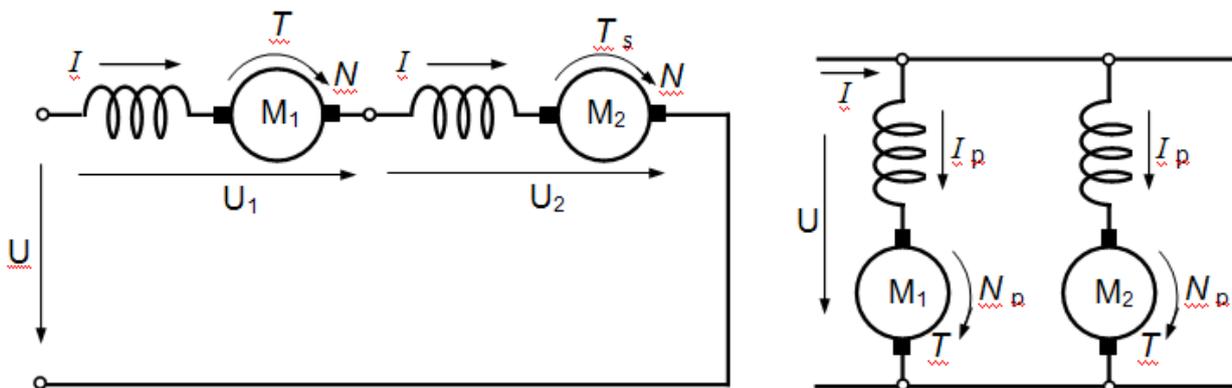
## Problema 10.

Dois motores iguais de corrente contínua de excitação em série traccionam um carro eléctrico, estando o motor  $M_1$  a traccionar as rodas traseiras de diâmetro  $D_1$  e o motor  $M_2$  a traccionar as rodas dianteiras de diâmetro  $D_2$ , como ilustra a figura 2.

Despreza-se a resistência óhmica do indutor  $r_s$ , a resistência do induzido  $R_l$  e a resistência de contacto escovas/colector. Admite-se que o circuito magnético dos motores é linear, isto é,  $\Phi = K \times I$ .



Os dois motores série são inicialmente associados em *série* e depois em *paralelo*, como mostra a figura.

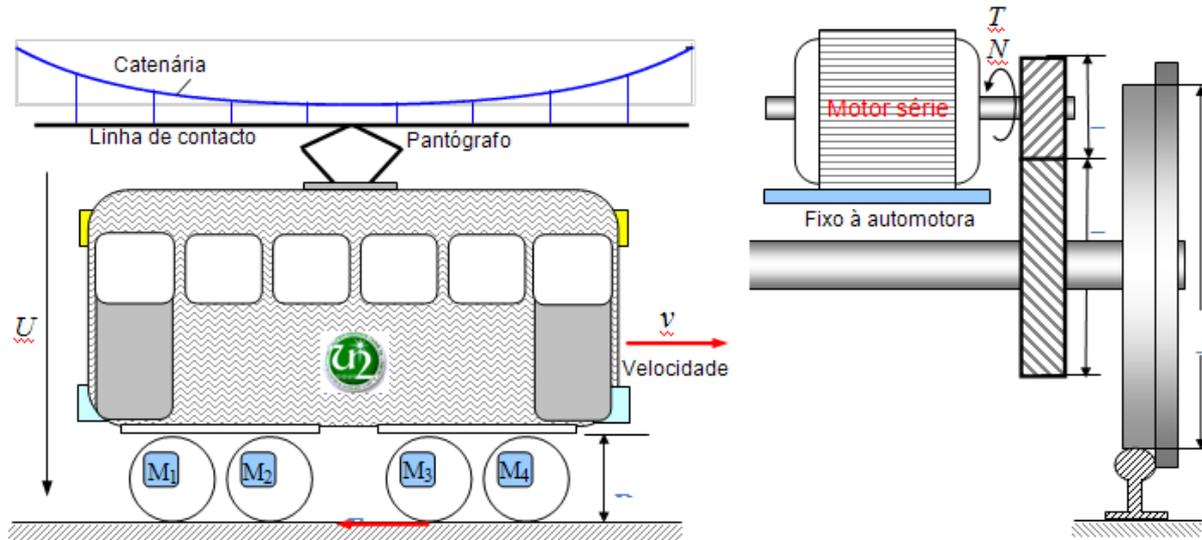


Admitindo que ambas as associações absorvem a mesma potência  $P = UI$  à catenária, pede-se:

1. Deduzir as relações entre as velocidades  $N_s/N_p$  e entre os binários  $T_s/T_p$  das duas associações. Deste resultado concluir qual das associações se deve usar no arranque e em marcha normal.
2. Quando os dois motores série estão ligados em paralelo, sabe-se que a potência eléctrica total absorvida pelos dois motores é de  $P = 150 \text{ kW}$  quando a tensão da catenária for de  $U_n = 1500 \text{ V}$ . Para o caso dos dois pares de rodas terem diâmetros diferentes com os valores  $D_1 = 950 \text{ mm}$  e  $D_2 = 1000 \text{ mm}$  (apenas diferem de 5 mm), calcular as correntes  $I_1$  e  $I_2$  em cada motor e a relação de binários  $T_1/T_2$ . Dizer em qual do par de rodas a força  $F$  roda/carril é maior.
3. Na prática é necessário rectificar periodicamente o diâmetro das rodas. Porquê?

## Problema 11.

É dado um motor de excitação em série em que se despreza a resistência óhmica do indutor  $R_s$ , a resistência do induzido  $R_l$  e a resistência de contacto escovas/colector. Sabe-se que a f.c.e.m. gerada pelo motor vale  $E(V) = 20N\Phi_p$ , com  $N$  em rps e  $\Phi_p$  em Wb. Admite-se que o circuito magnético do motor é linear, isto é,  $\Phi_p(\text{Wb}) = 0,05I(\text{A})$ .



1. Deduzir as expressões das suas características de binário  $T(I)$  e de velocidade  $N(I)$  em função da corrente  $I$  absorvida pelo motor bem como a sua característica electromecânica  $T(N)$  e traçar o seu andamento aproximado a tensão de alimentação constante. Descrever as vantagens e desvantagens do motor de excitação em série e indicar algumas das suas aplicações industriais. Explicar fisicamente porque razão este motor embala em vazio mecânico.
2. Quatro motores série iguais ao anterior accionam dois “boogies” de uma automotora, como ilustra a figura 3. Inicialmente os dois motores são ligados em série desenvolvendo um binário  $T_s$  e uma velocidade  $N_s$  e depois em paralelo desenvolvendo um binário  $T_p$  e uma velocidade  $N_p$ . Admitindo que ambas as associações absorvem a mesma potência eléctrica  $P = UI$  à linha de contacto, calcular as relações  $T_s/T_p$  e  $N_s/N_p$ . Deste resultado justificar qual das associações se deve usar no arranque e em marcha normal.
3. Os motores de excitação em série anteriores traccionam a automotora através de uma caixa de engrenagens reductora de velocidade de razão  $G = D_1/D_2 = 0,2$  e o diâmetro das oito rodas da automotora vale  $D = 1$  m, como mostra a figura 4. A tensão da linha de contacto/carril vale  $U = 1500$  V. Quando os motores estão em paralelo, desenvolvendo cada um uma potência de 75 kW, calcular a velocidade  $v$  em km/h da automotora e a força  $F$  roda/carril em cada roda.
4. As rodas traseiras accionadas pelo motor  $M_1$  sofrem um desgaste de modo ao seu diâmetro passar para  $D' = 950$  mm e as restantes rodas mantêm o mesmo diâmetro  $D = 1000$  mm. Calcular a corrente  $I' = I_1$  no motor  $M_1$  e  $I'' = I_2 = I_3 = I_4$  nos outros motores quando estão em paralelo e absorvem da catenária uma potência total de 300 kW. Explicar qual a manutenção a ter com as rodas das automotoras para equilibrar a corrente absorvida em todos os motores.
5. Mostrar, com auxílio de um diagrama, para que servem os pólos auxiliares de comutação do motor

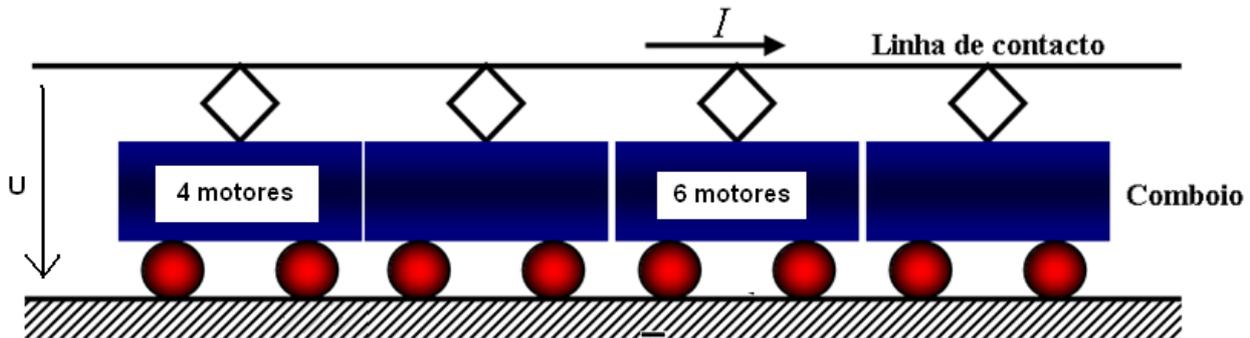
## Problema 12.

Aos terminais do induzido de um motor de corrente contínua de excitação separada aplicou-se uma tensão de 200V. Em vazio a velocidade desenvolvida foi 1500rpm, a resistência da armadura é  $2,5\Omega$ , a reacção magnética, a queda de tensão nas escovas e as perdas rotacionais são desprezáveis.

1. Escreva a equação da característica mecânica do motor.
2. Para um binário de carga constante de 10Nm, calcule a velocidade do rotor e resolva as questões seguintes ilustrando com gráficos explicativos no plano ( $\omega, T$ ).
3. Que resistência adicional se deve colocar em série com a armadura para que a velocidade em carga passe a ser 50 rad/s? E para que o rotor fique imóvel?
4. Calcule a velocidade e a corrente da armadura se a resistência adicional a introduzir em série com a armadura apresentar o valor de  $27,5\Omega$ ?
5. Colocou-se em série com a armadura uma resistência adicional de  $14,86\Omega$  e, após alguns instantes, inverteu-se o sentido da tensão aplicada à armadura, isto é, passou a ser  $-200V$ . Após a inversão quais os valores do binário electromagnético e da corrente da armadura ?
6. Após a inversão a velocidade desce. Qual a corrente da armadura quando a velocidade se anula?
7. Se a inversão da tensão tivesse ocorrido sem ter introduzido a resistência adicional que valor terá a corrente da armadura após a inversão?
8. A partir da situação inicial diminuiu-se bruscamente a tensão de 200V para 160V. No momento da diminuição qual o valor da f.e.m. do motor?
9. Calcule o binário de frenagem e a corrente na armadura após a diminuição da tensão aplicada à armadura e escreva a nova equação da característica mecânica.
10. A partir da situação inicial em carga desligou-se a tensão aplicada à armadura e colocou-se em série com esta um reóstato de  $10\Omega$ . Qual o binário de frenagem e a corrente da armadura.
11. Escreva a equação da característica mecânica.

## Problema 13.

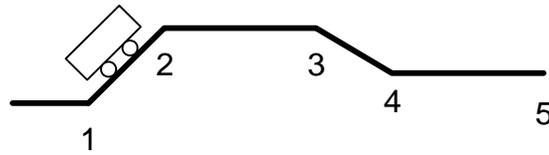
Considere a composição apresentada na figura seguinte. A potência de cada motor vale 375 Cv e o rendimento 90%. A tensão de alimentação dos motores vale 1500 Vdc e a sua corrente de arranque supera em 20% a corrente nominal. A linha tem um comprimento de 100 km e é constituída por carris de 60 kg/m.



1. Calcule a secção da linha de contacto admitindo uma densidade de corrente no cobre igual a 8 A/mm<sup>2</sup>.
2. Qual a distância mínima entre sub-estações, sem feeder e considerando toda a linha interligada e com pouco tráfego.
3. Repita a alínea anterior considerando a existência de feeders com ligação paralela na meia distância.

## Problema 14.

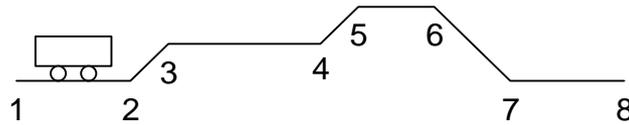
Considere um veículo accionado por um motor eléctrico, alimentado por um conversor electrónico de potência, cujo objectivo é deslocá-lo da posição (1) até à posição (5) no menor intervalo de tempo, considerando as restrições ao nível do binário e da velocidade.



1. Desenhe os diagramas de binário e velocidade respectivos, desprezando a existência de atrito. Admita que, por aplicação do binário máximo disponível a velocidade máxima é atingida antes da posição (2).
2. Diga justificando qual o tipo de conversor adequado para alimentar o motor eléctrico.

## Problema 15.

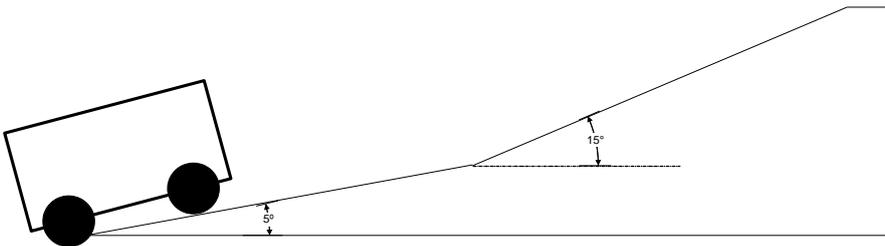
Considere um veículo accionado por um motor eléctrico de corrente contínua, alimentado por um conversor electrónico de potência, cujo objectivo é deslocá-lo da posição (1) até à posição (8) no menor intervalo de tempo, considerando as restrições ao nível do binário e da velocidade.



1. Desenhe os diagramas de binário e velocidade respectivos, desprezando a existência de atrito. Admita que, por aplicação do binário máximo disponível a velocidade máxima é atingida antes da posição (2).
2. Diga justificando qual o tipo de conversor adequado para alimentar o motor eléctrico.
3. Explique o processo de recuperação de energia e onde ocorre.

## Problema 16.

Pretende-se equipar um veículo com um motor eléctrico de corrente contínua com excitação série e respectiva caixa de transmissão. O veículo deverá conseguir efectuar o percurso da figura com uma velocidade constante de 420 m/minuto. O peso do veículo é de 280 kgf e as forças de atrito podem considerar-se constantes e iguais a 30 kgf. O veículo é alimentado através de 6 baterias de 12 V cada, ligadas em série, e a velocidade nominal do motor são 1000 rpm.



Motor P <sub>n</sub> [cv]	$\eta_n$ motor [%]	Caixa $\eta_n$ caixa [%]
11	80	85
12	90	80
10	97	95

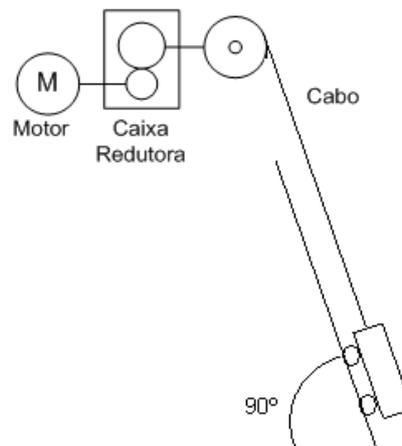
- Qual das hipóteses escolhia para a aplicação em causa?
- Determine os valores nominais da corrente e do binário do motor escolhido.

## Problema 17.

Um comboio eléctrico percorre uma distância de 1,6km entre duas estações a uma velocidade média de 40km/h. Na partida da estação a aceleração inicial é de 2km/h/s. Após atingir a velocidade máxima, o motor deixa de fornecer potência mecânica ao comboio diminuindo a velocidade com uma desaceleração constante de 0,16km/h/s. Perto da estação de destino o motor entra em regime de travagem com uma desaceleração constante de 3,2km/h/s, parando na estação de destino. Determine o tempo de aceleração inicial, o tempo de funcionamento a potência nula e o tempo de travagem. Determine ainda as distâncias percorridas em cada um dos tempos anteriores.

## Problema 18.

Considere o seguinte sistema de tracção por cabo, accionado por um motor eléctrico e caixa redutora de velocidade. O motor apresenta um momento de inércia de  $J_m=1\text{kgm}^2$ . A caixa redutora de velocidade tem uma relação 10:1 e um momento de inércia de  $J_r=0,2\text{kgm}^2$ . O tambor tem um raio de 0,3m e um momento de inércia de  $J_c=3\text{kgm}^2$ . A carga tem 100kg. Despreze a elasticidade dos veios e do cabo.



1. Determine a equação dinâmica do sistema, visto do lado do motor.
2. Determine o binário a aplicar pelo motor eléctrico em regime permanente para a carga subir a velocidade constante.
3. Represente graficamente a evolução do binário, da velocidade e da potência do motor quando este procede a um ciclo de funcionamento (subida de 30m e descida), atendendo às seguintes limitações:  
 Velocidade máxima: 2m/s  
 Binário máximo disponível na tracção: 1,6 x Binário nominal  
 Potência máxima: 20kW
4. Compare a situação anterior com a que resulta de não haver limitações de potência.

## Problema 19.

Considere um accionamento eléctrico com uma carga mecânica inercial pura, accionado por um motor de corrente contínua de excitação independente considerada constante. O momento de inércia da carga vale  $J=40\text{kgm}^2$  e o coeficiente de atrito viscoso é desprezável. A resistência do induzido é de  $R_a=0,1\Omega$ , a sua indutância é considerada desprezável e  $K_{st}=4\text{Nm/A}$ . Por aplicação de uma tensão de 120V, verifique que a energia dissipada na resistência do induzido iguala a energia armazenada nas massas girantes, após a velocidade do accionamento ter atingido o seu valor final.

## Problema 20.

Considere um sistema de tracção accionado por um motor de corrente contínua de excitação independente e constante. O momento de inércia da carga vale  $J=300\text{kgm}^2$  e o coeficiente de atrito viscoso vale  $K_D=1\text{Nm/radseg}^{-1}$ . A resistência do induzido vale  $R_a=1\Omega$ , a sua indutância é considerada desprezável e  $K_{sif}=7\text{Nm/A}$ . Após a aplicação de uma tensão de 100V, determine o tempo de estabelecimento da velocidade. Considera-se como tempo de estabelecimento o tempo necessário para se considerar extinto o regime livre. Na prática considera-se que a velocidade se encontra a 5% do se valor final.

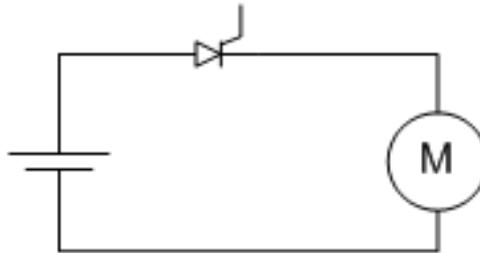
## Problema 21.

Considere um transportador mecânico accionado por um motor eléctrico, com momento de inércia  $J=3\text{kgm}^2$  e atrito viscoso  $k_d=0,22\text{Nms}$ . Sabe-se que a velocidade do motor passa de 500rpm para 1000rpm em 10 segundos.

- Sabendo que a carga mecânica (considerada constante) vale 50Nm, determine o binário motor necessário para acelerar o sistema.
- Sabendo que a partir dos 10 segundos o sistema inicia uma desaceleração natural, determine o tempo que o mesmo demora a parar (considere como parado 0,5% da velocidade inicial).

## Problema 22.

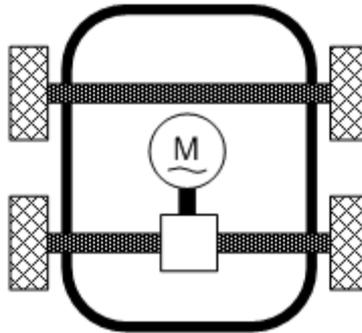
Um motor de corrente contínua, excitação independente com  $K_a\Phi=0,286$ , de resistência  $0,28\Omega$  e indutância  $0,57\text{mH}$ , é ligado através de um rectificador monofásico comandado, a uma fonte de  $220\text{V}$  ( $50\text{Hz}$ ). O seu momento de inércia vale  $0,01\text{ kgm}^2$  e o binário de carga  $126\text{N}$  a  $6000\text{rpm}$ .



1. Considerando que com um ângulo de disparo de  $40^\circ$  o motor roda a  $5000\text{rpm}$  quando a condução cessa, determine a perda de velocidade do motor. Despreze o efeito da indutância.
2. Determine a função de transferência global  $\omega(s)/U_c(s)$ , considerando  $k=10$  como o ganho do 'conversor electrónico de potência e respectivo circuito de comando'. Explícite os pólos da função de transferência.
3. Suponha que pretende um controlador em cadeia fechada do tipo PID. Determine as suas constantes.
4. Considere que o conversor utilizado é um rectificador monofásico em ponte totalmente comandado (com  $k=10$ ). Explique como poderia determinar as constantes de um controlador em malha fechada do tipo PI.

## Problema 23.

Considere um transportador eléctrico accionado por intermédio de um motor de indução e de uma caixa redutora de velocidade. A massa total do veículo vale 600kg, a sua velocidade de deslocamento nominal 1m/s e a aceleração máxima permitida  $0,5\text{m/s}^2$ . O diâmetro das rodas mede 200mm. O atrito viscoso pode ser considerado desprezável, mas o atrito estático vale 50N. Das quatro hipóteses seguintes, qual a associação ‘motor+caixa’ que se adequa ao accionamento.



Opção	Motor								Caixa	
	P [W]	pólos	$S_{nom}$ [%]	f [hz]	$\eta$ [%]	$\cos \phi$	$T_{max}$ [N]	J [kgm <sup>2</sup> ]	i	$\eta$ [%]
1	70	1 par	5	50	85	0,85	1,5	0,000352	30	80
2	50	1 par	5	50	80	0,85	1,5	0,00025	100	70
3	80	1 par	5	50	85	0,85	1	0,00043	30	80
4	100	1 par	5	50	90	0,85	2	0,00082	30	80

## Problema 24.

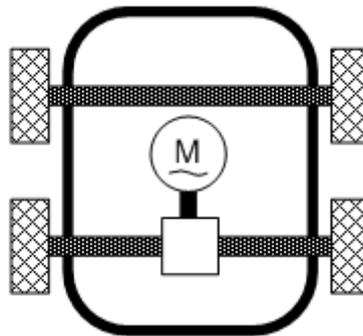
Considere um transportador mecânico accionado por um motor de indução trifásico, alimentado a partir da rede eléctrica nacional de baixa tensão, e uma caixa redutora de velocidade que apresenta um rendimento de 70%. O total das forças exteriores vale 600N e a velocidade é constante e igual a 0,7m/s. O diâmetro das rodas motrizes vale 0,2m. Encontram-se disponíveis os seguintes motores:

Motor	Potência [kW]	nº de pares de pólos	Ligação dos enrolamentos	Rendimento [%]	Factor de potência	Escorregamento nominal [%]
A	0,3	3	Estrela	85	0,87	4,3
B	0,2	1	Estrela	80	0,90	5,0
C	0,7	2	Triângulo	95	0,85	6,6

- Escolha justificadamente o motor adequado.
- Em função do motor escolhido, determine a relação de transmissão da caixa redutora de velocidade.
- Em função do motor escolhido, determine o rendimento global do sistema.
- Determine a corrente que percorre cada enrolamento do motor escolhido, para um total das forças exteriores iguais a 600N.

## Problema 25.

Considere um transportador eléctrico accionado por intermédio de um motor de indução e de uma caixa redutora. Considere ainda que o momento de inércia, referido ao motor, de todas as partes rotativas, à excepção do próprio motor, vale  $0,015\text{kgm}^2$  e que o coeficiente de atrito estático total, também referido ao lado do motor, vale  $K_D=0,05$ . A caixa redutora de velocidade é constituída internamente por rodas dentadas, apresentando uma relação entre diâmetros de 50 e um rendimento de 70%.



- Sabendo que necessita de efectuar uma força de  $600\text{N}$ , sobre o veículo, para este se deslocar a uma velocidade constante de  $0,8\text{m/seg}$ , determine a potência e a velocidade nominal do motor.
- Para um rendimento global do sistema superior a 50%, determine o rendimento que o motor tem de apresentar.
- Determine a equação da dinâmica do sistema, assumindo como variável de estado a velocidade do motor e como variável de entrada o binário desenvolvido por este.

## Problema 26.

Considere um transportador eléctrico accionado por intermédio de um motor de indução e de uma caixa redutora. Considere que o momento de inércia, referido ao motor, de todas as partes rotativas, à excepção do próprio motor, vale  $0,015\text{kgm}^2$ . O coeficiente de atrito estático vale  $K_D=0,05$ . Considere ainda os seguintes dados:

Motor:

$$P=1500\text{W}$$

$$N_{\text{nom}}=1400\text{rpm}$$

$$\cos\varphi=0,85$$

$$\eta=95\%$$

$$J=0,004\text{kgm}^2$$

$$U_c=380\text{V}$$

Veículo:

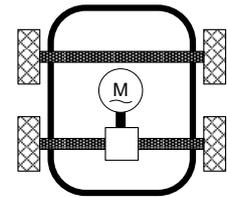
$$v_{\text{nom}}=1,2\text{m/s}$$

$$r_{\text{rodas}}=250\text{mm}$$

$$m=1500\text{kg}$$

Caixa redutora:

$$\eta=90\%$$



1. Determine a equação da dinâmica de todo o sistema, assumindo como variável de estado a velocidade do motor e como variável de entrada o binário desenvolvido por este.
2. Admitindo que o motor desenvolve um binário constante de  $5\text{Nm}$ , determine a velocidade linear do veículo.
3. Considerando a situação anterior, determine o rendimento global de todo o sistema.

## Problema 27.

Considere o seguinte transportador eléctrico, cujas rodas têm um diâmetro de 250mm. Este é accionado por um motor assíncrono trifásico acoplado a uma caixa redutora de velocidade. Considere ainda os seguintes dados:

Motor:

$$P_{\text{nom}}=550\text{W}$$

$$N_{\text{nom}}=1050\text{rpm}$$

$$\cos\varphi=0,8$$

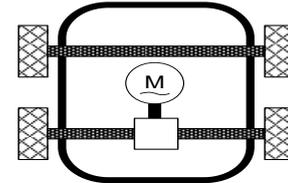
$$\eta=90\%$$

$$T_{\text{max}}=6\text{Nm}$$

Caixa de transmissão:

$$\text{Relação de transmissão } (i)=20:1$$

$$\eta=95\%$$



O momento de inércia de todo o sistema, reduzido ao motor, vale  $J=0,06\text{kgm}^2$ .

O coeficiente de atrito viscoso de todo o sistema, reduzido ao motor, vale  $K_D=0,04$ .

Todos os restantes atritos são desprezáveis.

Condições de funcionamento:

O veículo é inicialmente acelerado por meio do binário máximo disponível no motor, de  $t_{\text{inicial}}=0\text{seg}$  a  $t_1=2\text{seg}$ . De  $t_1$  a  $t_2=10\text{seg}$  é desenvolvido um binário por forma a manter o veículo a deslocar-se a uma velocidade constante. De  $t_2$  a  $t_3=12\text{seg}$  o motor é desligado, não sendo por isso desenvolvido nenhum binário, e o veículo desloca-se em amortecimento natural. De  $t_3$  a  $t_{\text{final}}$  efectua-se uma travagem regenerativa por aplicação de um binário inverso de valor igual ao nominal.

O sistema de controlo do veículo anula o binário de travagem assim que a velocidade se anular.

1. Represente o ciclo de funcionamento do binário.
2. Estabeleça o modelo dinâmico do veículo:  $v=f(T)$ .
3. Determine analiticamente as expressões que representam a velocidade linear do veículo, ao longo dos vários intervalos de tempo considerados. Represente o ciclo de funcionamento da velocidade (linear do veículo e angular do motor).
4. Represente o ciclo de funcionamento da potência do motor.
5. Determine a energia recuperada na travagem.
6. Represente a evolução do veículo no plano  $(T, \omega)$ .
7. Na situação de velocidade constante, determine o rendimento global de todo o sistema sabendo que o motor absorve uma corrente de 1A.
8. Determine a massa do veículo sabendo que o momento de inércia das partes rotativas, reduzido ao motor, vale  $0,003\text{kgm}^2$ .

## Problema 28.

Considere um transportador eléctrico accionado por um motor de indução, uma caixa redutora e uma transmissão por corrente.

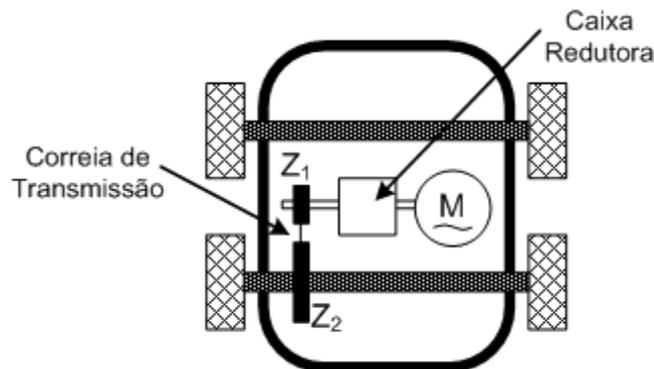
A massa total do veículo vale 800kg, a sua velocidade de deslocação vale 0,5m/s e a aceleração máxima permitida vale  $0,6\text{m/s}^2$ .

O veículo apresenta um atrito estático de 64N e um atrito viscoso desprezável. As suas rodas apresentam um diâmetro de 200mm.

A transmissão de corrente apresenta  $Z_2=29$  dentes e  $Z_1=16$  dentes, com um rendimento de 85%.

As caixas redutoras disponíveis apresentam todas um rendimento de 95%.

Os motores de indução disponíveis têm quatro pólos e funcionam com um escorregamento nominal de 6,6%.



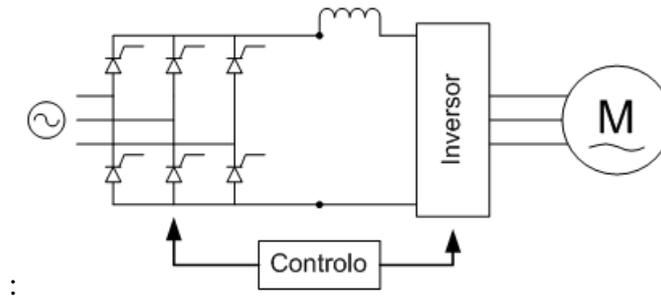
1. Qual a relação de transmissão a escolher para a caixa redutora?
2. De entre os seguintes motores qual escolheria?
- 3.

Motor	Potência [kW]	$\eta$ [%]	$\cos \varphi$	J [kgm <sup>2</sup> ]
A	0,04	90	0,8	0,00025
B	0,15	90	0,85	0,000352
C	0,5	85	0,8	0,00043

4. Qual o binário máximo exigível ao motor?
5. Qual o binário máximo constante disponível à saída da caixa redutora? Considere a velocidade de deslocamento admitida para o veículo.

## Problema 29.

Considere um motor trifásico com 50Cv destinado a accionar um transportador de cremalheira, 1165rpm de velocidade nominal, 440V, 78A, 50Hz e rendimento de 82%. Este motor é alimentado por um inversor a trabalhar como fonte de corrente, com um rendimento de 94%.

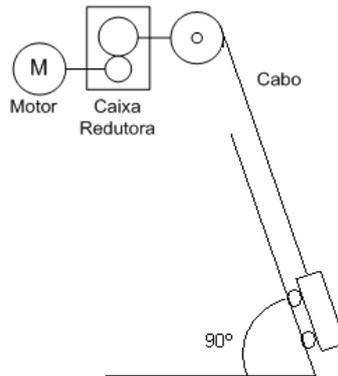


Determine

1. A potência de entrada do inversor.
2. A corrente que circula na bobina.
3. A tensão de saída do rectificador controlado.

## Problema 30.

Considere o sistema de accionamento apresentado na figura. Este deve ser capaz de elevar uma carga de 22T a 0,1m/s. A caixa redutora de velocidade tem uma relação 50:1 e o conjunto caixa+roldana apresenta um rendimento de 90%.



1. Considerando o conjunto de motores apresentado na tabela, escolha o motor adequado, calculando o binário de arranque à saída da caixa redutora.
2. Admita que vinte destes sistemas se encontram numa fábrica, juntamente com um conjunto fornos de aquecimento que totalizam um potência de 320kW, alimentada por uma subestação de distribuição de energia eléctrica. Determine a corrente de regime permanente fornecida pela subestação, sabendo que as anteriores cargas correspondem a 83% da potência nominal da subestação.

$P_{nom}$ [kW]	$N_{nom}$ [rpm]	$T_{nom}$ [Nm]	$T_{arr}/T_{nom}$	$I_{non}$ [A]	$\cos\phi$	$I_{arrdir}/I_{nom}$
17	1400	132	2,4	40	0,85	6,3
30	1465	196	2,7	58	0,86	6,4
115	1485	700	2,5	200	0,87	6,8
190	1480	1300	2,6	370	0,87	6,9

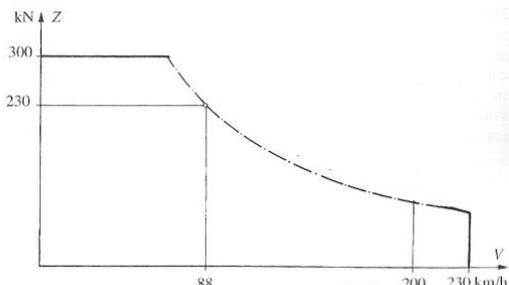
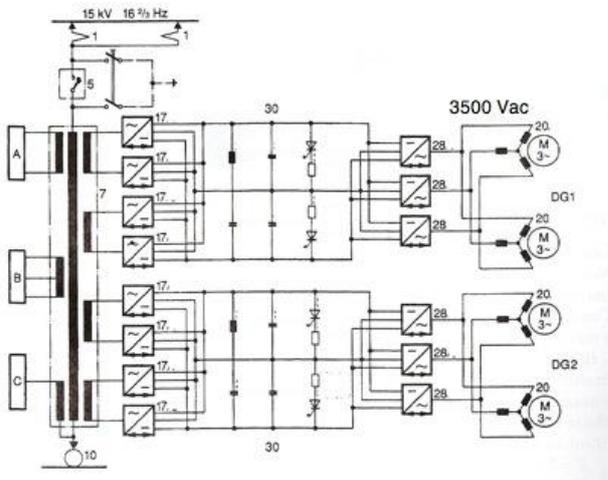
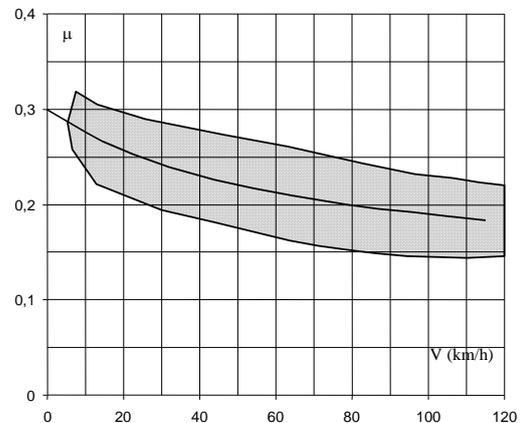
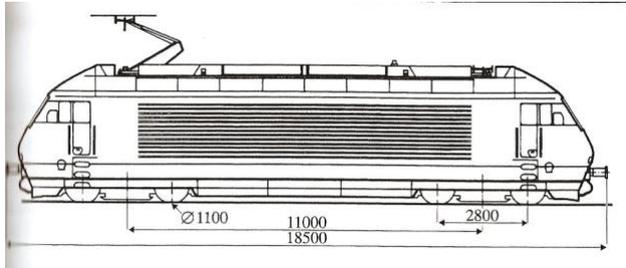
## Problema 31.

Considere uma pequena linha de caminho de ferro com as seguintes características:

- 20 km de comprimento em via única;
- Alimentação a 15000 Vac (16 2/3 Hz);
- Alimentada por duas subestações, em cada uma das extremidades (sem feeders);

A locomotiva Re460 (*R* refere-se a alta velocidade, *e* a eléctrica, *4* ao número de eixos com motorização independente e *6* à evolução), ao serviço de 1991 e que circula nesta linha, tem as seguintes características:

- Peso total de 84 toneladas;
- Caixas reductoras de velocidade com relação 1:3667;
- Potência nominal / máxima: 5600 / 6100 kW;



- Identifique os números (1, 5, 7, 17, 20, 28 e 30) no esquema eléctrico.
- Classifique a locomotiva quanto aos eixos tractores.
- Admitindo que a locomotiva circula sozinha na linha, em regime nominal, determine o valor mínimo de tensão na linha. Considere um factor de potência igual a 0,85 para os motores e admita as simplificações que entender necessárias.
- Determine o binário máximo desenvolvido por cada motor no arranque, sem patinagem.
- Considere que a locomotiva circula a 88km/h em linha recta horizontal, traccionando um conjunto de carruagens com massa total de 500 toneladas. A resistência ao movimento, por tonelada, é dada por  $R=15+0,004V+(1/440)V^2$ , com  $R$  em N/ton e  $V$  em km/h. Nestas condições determine a aceleração da composição.

## Problema 32.

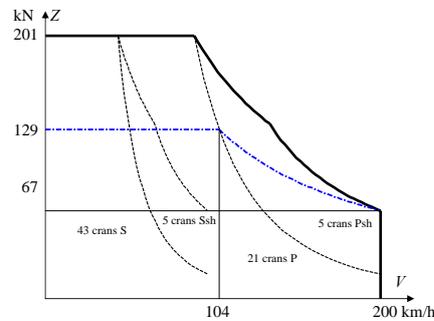
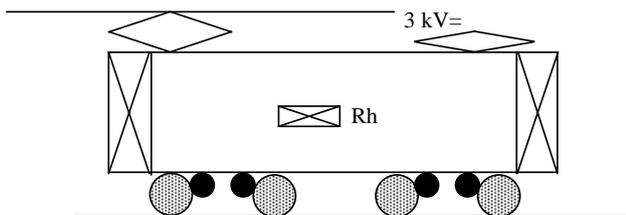
A locomotiva E444 entrou ao serviço em 1965 e tem as seguintes características principais:

- Velocidade máxima: 200 km/h
- Massa: 83 ton
- Força nominal em regime contínuo: 129 kN a 104 km/h
- Força máxima: 201 kN
- Potencia contínua nominal (eléctrica): 3820 kW
- Motores DC (3 kV)
- A relação de transmissão da caixa vale: 1:1,925

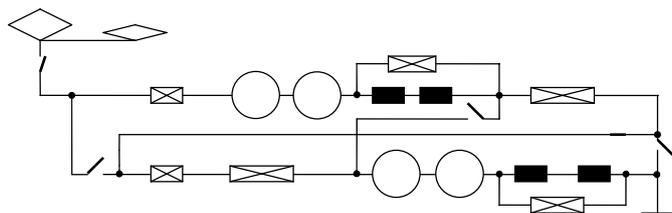


A resistência ao movimento da locomotiva, por tonelada, é dada por  $F_{loco} = 13 + 0,1V + 0,375(V/10)^2$ , com  $F_{loco}$  em N/ton e  $V$  em km/h.

A resistência ao movimento de cada vagão, por tonelada, é dada por  $F_{vago} = 12,5 + V^2/630$ , com  $F_{vago}$  em N/ton e  $V$  em km/h.



- Qual o esforço de tracção necessário para mover (a velocidade constante de 200 km/h e em recta plana) um comboio de 8 vagões (com 42 toneladas cada um) traccionados por uma locomotiva E444.
- Nas condições da alínea anterior qual o valor máximo de aceleração que ainda se pode obter para todo o comboio.
- Ainda nas condições da alínea a), determine a potencia necessária para mover todo o comboio (a velocidade constante de 200 km/h).
- Determine o rendimento global do conjunto motor/transmissão da locomotiva, em regime nominal.
- Nas condições da alínea a) (velocidade de 200 km/h), determine a corrente absorvida do fio de contacto.
- Em face das condições anteriores determine a secção do fio de contacto, sabendo que o mesmo é constituído por cobre com uma densidade de corrente de  $J = 8 \text{ A/mm}^2$ .
- Classifique a locomotiva quanto aos eixos tractores.
- Como pode observar os motores da locomotiva podem ser ligados em série ou paralelo. Explique, justificando, a razão esta possibilidade.
- Sabendo que a corrente de arranque de cada motor supera a corrente nominal em 20%, determine a corrente pedida em cada motor no arranque.
- Nas condições da alínea a), determine o binário em cada roda, admitindo um diâmetro de 1000 mm para as rodas.



## Problema 33.

Considere um comboio traccionado por duas automotoras nas extremidades (uma Bo'Bo' e outra Co'Co') e com duas carruagens de passageiros. Cada motor série tem uma potencia estipulada de 150Cv, um rendimento de 90%, uma velocidade estipulada de 1200rpm e uma capacidade de sobrecorrente de 1,2 vezes, sendo alimentados directamente a partir de uma catenária com tensão contínua de 1500V.

- Determine a máxima corrente que pode ser pedida ao fio de contacto no arranque.
- Em face das condições anteriores determine a secção do fio de contacto, sabendo que o mesmo é constituído por cobre com uma densidade de corrente de  $J=8A/mm^2$ .
- Explique porque razão o fio de contacto não é amarrado directamente ao poste, e como tal é feito.
- Se cada motor desenvolver um binário estipulado de 700Nm, determine a velocidade angular estipulada de cada motor.
- Como pode fazer para aumentar a velocidade dos motores mantendo o binário anterior? Desenhe o respectivo esquema.

## Problema 34.

Considere um transportador mecânico accionado por um motor de indução trifásico, alimentado a partir da rede eléctrica nacional de baixa tensão, e uma caixa redutora de velocidade que apresenta um rendimento de 70%. O total das forças exteriores vale 600N e a velocidade é constante e igual a 0,7m/s. O diâmetro das rodas motrizes vale 0,2m. Encontram-se disponíveis os seguintes motores:

Motor	Potência [kW]	nº de pares de pólos	Ligação dos enrolamentos	Rendimento [%]	Factor de potência	Escorregamento nominal [%]
A	0,3	3	Estrela	85	0,87	4,3
B	0,2	1	Estrela	80	0,90	5,0
C	0,7	2	Triângulo	95	0,85	6,6

- Escolha justificadamente o motor adequado.
- Em função do motor escolhido, determine o rendimento global do sistema, escolhendo a relação de caixa adequada.

## Problema 35.

Considere uma fábrica onde existem transportadores eléctricos de vagões frigoríficos onde é necessária uma força de 215,6 kN para o movimentar cada um a uma velocidade de 0,1 m/s. O motor eléctrico é um motor de indução trifásico (380 V / 50 Hz) e acciona o único eixo tractor através de uma caixa de transmissão de relação 1:50 e rendimento 90%.

a) Considerando o conjunto de motores apresentado na tabela, escolha o motor adequado, calculando o binário de arranque à saída da caixa redutora.

$P_{nom}$ [kW]	$N_{nom}$ [rpm]	$T_{nom}$ [Nm]	$T_{arr}/T_{nom}$	$I_{non}$ [A]	$\cos\phi$	$I_{arrdir}/I_{nom}$
17	1400	132	2,4	40	0,85	6,3
30	1465	196	2,7	58	0,86	6,4
115	1485	700	2,5	200	0,87	6,8
190	1480	1300	2,6	370	0,87	6,9

b) Admita que na fábrica existem vinte transportadores eléctricos a funcionar em simultâneo. Adicionalmente cada um consome 16kW para manter os vagões refrigerados. Determine a corrente de regime permanente total absorvida aos vários fios de contacto.

## Problema 36.

Considere uma fábrica onde existem transportadores eléctricos de vagões frigoríficos onde é necessária uma força de 215,6 kN para o movimentar cada um a uma velocidade de 0,1 m/s. O motor eléctrico é um motor de indução trifásico (380 V / 50 Hz) e acciona o único eixo tractor através de uma caixa de transmissão de relação 1:50 e rendimento 90%.

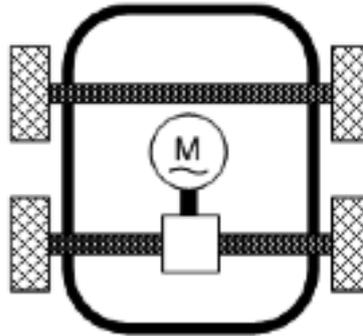
a) Considerando o conjunto de motores apresentado na tabela, escolha o motor adequado, calculando o binário de arranque à saída da caixa redutora.

$P_{nom}$ [kW]	$N_{nom}$ [rpm]	$T_{nom}$ [Nm]	$T_{arr}/T_{nom}$	$I_{non}$ [A]	$\cos\phi$	$I_{arrdir}/I_{nom}$
17	1400	132	2,4	40	0,85	6,3
30	1465	196	2,7	58	0,86	6,4
115	1485	700	2,5	200	0,87	6,8
190	1480	1300	2,6	370	0,87	6,9

b) Admita que na fábrica existem vinte transportadores eléctricos a funcionar em simultâneo. Adicionalmente cada um consome 16kW para manter os vagões refrigerados. Determine a corrente de regime permanente total absorvida aos vários fios de contacto.

## Problema 37.

Considere um transportador eléctrico accionado por intermédio de um motor de indução e de uma caixa redutora. Considere ainda que o momento de inércia, referido ao motor, de todas as partes rotativas, à excepção do próprio motor, vale  $0,015\text{kgm}^2$ . As rodas apresentam um diâmetro de 200 mm. A caixa redutora de velocidade é constituída internamente por rodas dentadas, apresentando uma relação entre diâmetros de 9 e um rendimento de 70%.

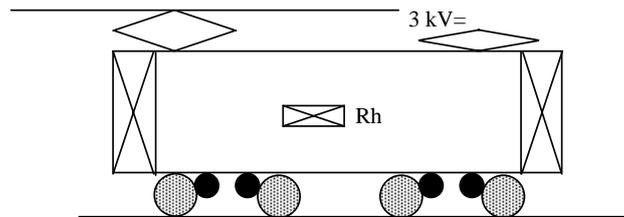


- Sabendo que necessita de efectuar uma força de 600N, sobre o veículo, para este se deslocar a uma velocidade constante de 0,8m/seg, determine a potência e o escorregamento nominal do motor.
- Para um rendimento global do sistema superior a 50%, determine o rendimento que o motor tem de apresentar.
- Sabendo que em movimento plano a equação da dinâmica do sistema (vista do lado do motor) tem a forma seguinte, determine o valor do coeficiente de atrito.

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - k\omega$$

## Problema 38.

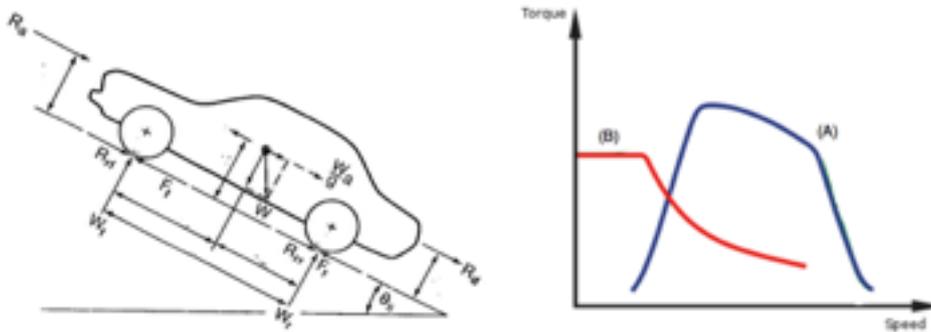
Considere uma composição traccionada por uma locomotiva de potencia nominal 2000kW. A tensão de alimentação vale 3000 Vdc, fornecidos por um fio de contacto de cobre com 400mm<sup>2</sup> de secção. A linha tem um comprimento de 170 km e é constituída por carris de 60 kg/m. Pretende-se que sejam consideradas o menor número possível de sub-estações na electrificação da linha.



1. Qual a distância mínima entre sub-estações, sem feeder e considerando toda a linha interligada e com pouco tráfego.
2. Repita a alínea anterior considerando a existência de feeders com ligação paralela na meia distância.

## Problema 39.

Considere o um veículo eléctrico com os seguintes dados: Potência Máxima=300kW;  
U<sub>bateria</sub>=200V; Capacidade Bateria=110kWh; CD=0,38. Este veículo roda numa estrada de asfalto  
( $f_r=0,01$ ) com uma inclinação de  $15^\circ$ . Considere a densidade do ar  $\rho=1,225\text{kg/m}^3$ .



- No veículo identifique as várias forças envolvidas.
- No gráfico Binário=f(velocidade) identifique, justificando, qual curva se refere ao veículo.
- Nas condições descritas sabe-se que é necessário desenvolver uma potência mecânica igual a 272 kW para deslocar o veículo a 100km/h. Considerando todas as rodas assentes no chão com piso igual e distribuição uniforme de peso, determine a massa do veículo.
- Nas mesmas condições, estime a corrente solicitada à bateria e a sua autonomia.

## Problema 40.

Considere um transportador mecânico (movendo-se em plano horizontal) de baixa velocidade, onde se despreza o atrito com o ar. O mesmo é accionado por um motor de corrente contínua de excitação independente constante com uma constante de proporcionalidade de binário  $k=7\text{Nm/A}$ , uma resistência eléctrica do induzido igual a  $R=1\Omega$ , e uma indutância considerada desprezável. O momento de inércia (reduzido ao motor) vale  $J=300\text{kgm}^2$  e o coeficiente de atrito viscoso (também reduzido ao motor) vale  $KD=1\text{Nm/radseg}^{-1}$ . Sabendo que o sistema de alimentação é constituído por um conjunto de baterias de iões de lítio (tensão nominal de  $100\text{Vdc}$  e capacidade nominal de  $110\text{kWh}$ ), determine:

- A velocidade do motor de regime permanente, por aplicação da tensão nominal.
- O tempo de estabelecimento desta velocidade (5% do seu valor final).
- A autonomia temporal do transportador.
- Considere que dispõe de 3 motores de indução trifásicos de várias potências ( $0,75\text{ kW}$ ,  $1,5\text{ kW}$  e  $3,0\text{ kW}$ ), todos com um factor de potência de  $0,85$  e tensão de alimentação  $U_c=400\text{V}$ . Caso tivesse de substituir o motor DC por um destes motores quanto valeria (em regime permanente) a corrente que percorreria cada um dos enrolamentos do motor quando este estivesse a fornecer a sua potência nominal.

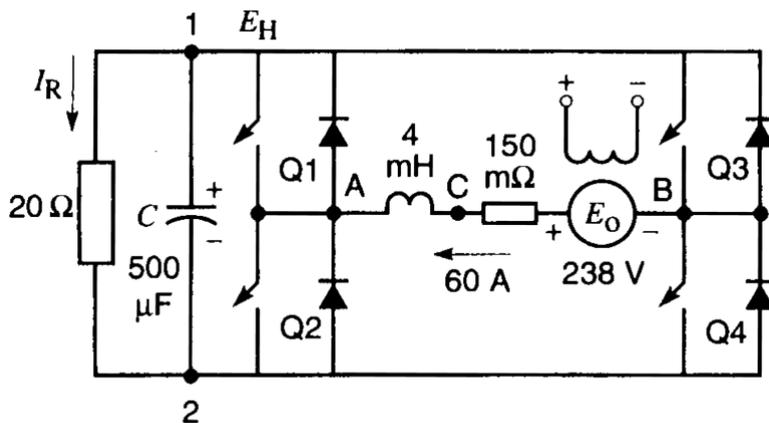
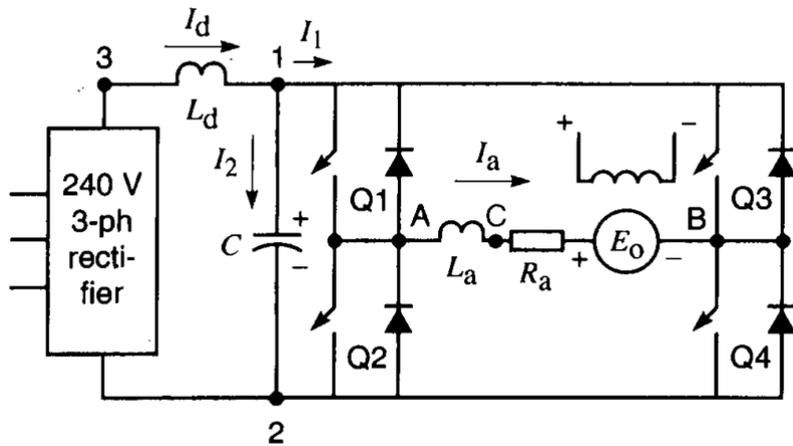
## Problema 41.

Considere um motor DC (25CV; 900 rpm; 250V) alimentado por um conversor a operar a 2kHz. Este conversor é alimentado por um rectificador trifásico de 6 pulsos ligado a uma rede 240V/60Hz.

- Qual o fator de ciclo quando o motor opera em condições nominais
- Desenhar as formas de onda de  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_a$ ;  $E_{12}$  e  $E_{AB}$

Considere que o motor está a rodar a 900rpm quando se inicia um processo de travagem (considere a inércia do motor e a carga elevadas por forma a que a velocidade não possa variar muito rapidamente) por aplicação de uma resistência de travagem de 20W. Assume-se que um binário de travagem igual a 75% do binário nominal é suficiente. Determinar:

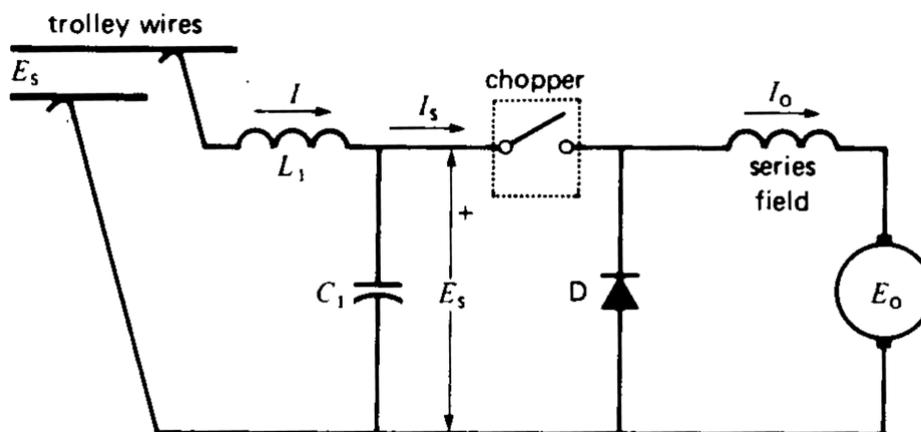
- A tensão aos terminais da resistência de travagem
- O fator de ciclo
- O comportamento do sistema durante a travagem



## Problema 42.

Considere um trolley movido por um motor DC (150CV; 1500 rpm; 600V). A corrente nominal de plena carga é 200A e a resistência da armadura+campo vale 0,1W. A catenária fornece uma tensão de 700V. O chopper controla o binário e a velocidade. A frequência varia entre 500 e 1600 Hz, mas o tempo de condução está fixo em 600useg.

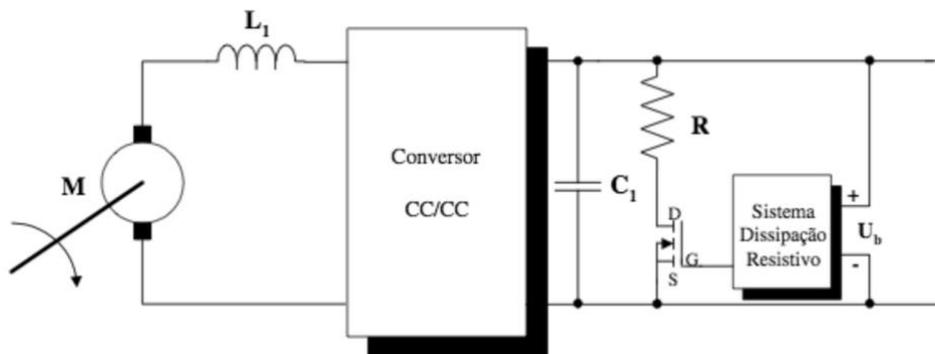
- Calcular a frequência do chopper e a corrente solicitada ao fio de contacto, quando o veículo se encontra parado e o motor consome 240A.
- Qual a frequência do chopper quando o motor funciona em regime nominal.



## Problema 43.

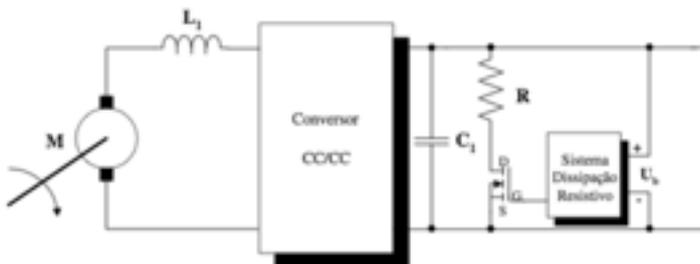
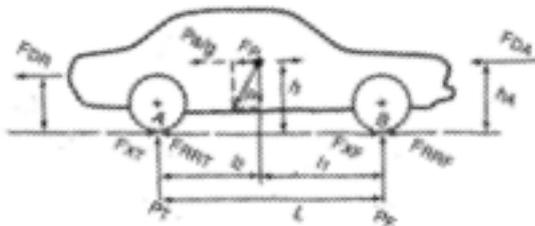
Considere um veículo eléctrico equipado com um motor DC (25CV; 900 rpm; 250V; L desprezável;  $R_a=150\text{m}\Omega$ ) alimentado por um conversor de quatro quadrantes, a operar a 2kHz. Este conversor é alimentado a partir de uma catenária operada a 700 Vdc.

- Determine o fator de ciclo quando o motor opera em condições nominais.
- Nas condições anteriores, determine o binário desenvolvido pelo motor, a corrente absorvida e a força electromotriz.
- Considere que o motor está a rodar a 900rpm quando se inicia um processo de travagem (considere a inércia do motor e a carga elevadas por forma a que a velocidade não possa variar muito rapidamente) por aplicação de uma resistência de travagem de  $20\Omega$  (ver figura). Assuma-se que um binário de travagem igual a 75% do binário nominal é suficiente. Determinar:
  - A tensão aos terminais da resistência de travagem.
  - O fator de ciclo.



## Problema 44.

Considere o um veículo eléctrico com os seguintes dados: Massa=1300kg; PotênciaMáxima=300kW; Ubateria=200V; CapacidadeBateria=110kWh;  $C_D=0,38$ . Este veículo roda numa estrada de asfalto ( $f_r=0,01$ ). Considere a densidade do ar  $\rho=1,225\text{kg/m}^3$ . Considere o vento frontal desprezável. O centro de massa encontra-se a uma altura de 1,0m, e a igual distância dos dois eixos. A distância entre eixos vale  $L= 2,7\text{m}$ . O veículo é movido através de um motor DC (25CV; 150V;  $L$  desprezável;  $R_a=150\text{m}\Omega$ ) alimentado por um conversor a operar a 2kHz. O conversor eletrónico de potência é um conversor de 4 quadrantes, controlado em PWM, permitindo aplicar ao motor os seguintes níveis de tensão:  $-U_{\text{bateria}}$ , 0,  $+U_{\text{bateria}}$ .

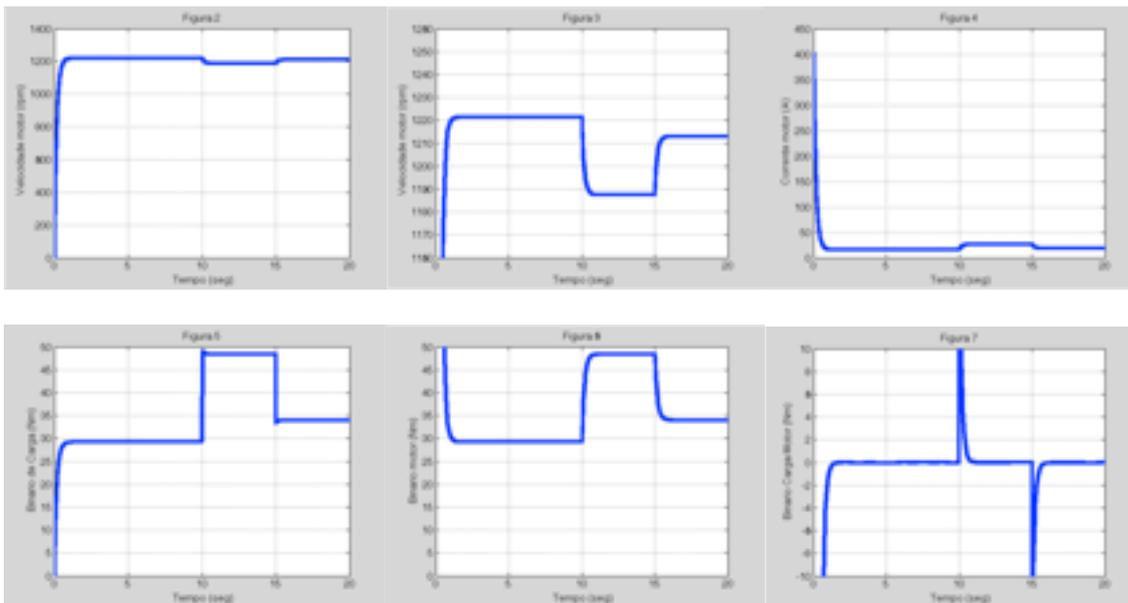
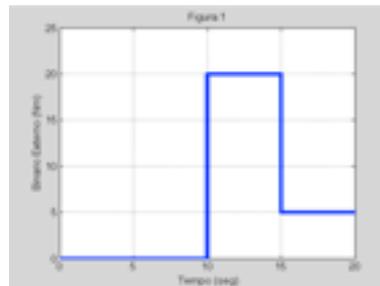


1. Identifique as várias forças aplicadas ao veículo e representadas na figura.
2. Nas condições descritas (movimento em plano horizontal), qual a potência mecânica necessária para deslocar o veículo a 100km/h. Considere todas as rodas assentes no chão com piso igual e distribuição uniforme de peso.
3. Nas mesmas condições, estime a corrente solicitada à bateria e a sua autonomia (tempo e distância a percorrer). Admita um estado de carga inicial igual a 100%; despreze o rendimento do conversor electrónico e a queda de tensão aos terminais da bateria.
4. Ainda nas condições da alínea 2, determine o peso exercido sobre as rodas do eixo dianteiro.
5. Considere que se acelera o veículo com  $a=0,46\text{m/s}^2$ . Nestas condições determine o peso exercido sobre as rodas dianteiras.
6. Determine o fator de ciclo do conversor eletrónico quando o motor opera em condições nominais.
7. Nas condições anteriores (e desprezando o rendimento do motor eléctrico), determine a corrente absorvida e a força electromotriz.

## Problema 45.

Considere um sistema de tracção eléctrica accionado por um motor de corrente contínua de excitação independente e constante, alimentado por uma fonte de tensão também constante ( $U=240V$ ). A este motor é aplicado um binário externo apresentado na figura 1. Todos os restantes gráficos se referem às condições de funcionamento impostas pelo binário de carga referido. Todas as grandezas apresentadas nos gráficos estão reduzidas ao motor.

A resistência do induzido do motor vale  $R_a=0,6\Omega$ , a sua indutância  $L_a=0,012H$  e a constante de magnetização  $K\phi=1,8Nm/A$ . O momento de inércia de todo o sistema vale  $J=1kgm^2$  e o coeficiente de atrito  $K_D=0,2287Nms$  (ambos reduzidos ao motor).



Considere as figuras 1 a 7.

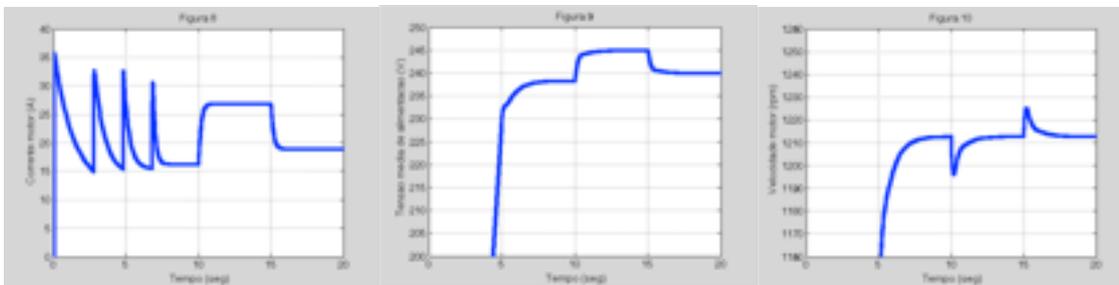
- Determine o valor exato do valor máximo da corrente na situação de arranque. Comente os efeitos que este valor pode ter no sistema de tracção eléctrico apresentado.
- Desprezando o pólo eléctrico do sistema de tracção, determine qual a velocidade do motor imediatamente antes de se atingir o instante de tempo  $t=10\text{seg}$ , sabendo que nesse instante a corrente vale  $16,25A$ .
- Determine o valor do binário de carga total do motor nesse instante.
- Relativamente à figura 7 explique:
  - Porque razão o valor é nulo nos instantes  $t=9\text{seg}$  e  $t=14\text{seg}$ .
  - A razão das variações ocorridas nos instantes  $t=10\text{seg}$  e  $t=15\text{seg}$ .
- Desprezando a indutância do motor determine a energia consumida no arranque (até ao instante  $t=10\text{seg}$ ).

Considere a figura 8.

6. De modo a não ultrapassar o valor de 35A no arranque foram introduzidas três resistências de arranque. Na figura 8 apresenta-se a evolução da corrente nesta situação de arranque. Determine a soma do valor das três resistências.

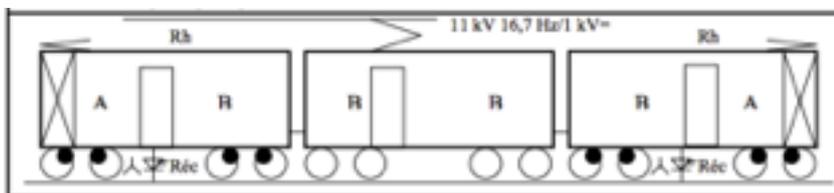
Considere as figuras 9 e 10.

7. Afim de controlar a velocidade do motor foi utilizado um rectificador controlado trifásico em ponte, controlado através de um PID. As figuras 9 e 10 apresentam a evolução do valor médio da tensão de alimentação do motor (proveniente do conversor electrónico de potência) e da sua velocidade. Calculando os pólos do sistema de tração original e do conversor electrónico de potência comente a influencia deste na dinâmica do sistema. Para o calculo despreze o efeito do binário externo.
8. Relativamente à figura 10, comente as variações de velocidade nos instantes  $t=10\text{seg}$  e  $t=15\text{seg}$ , comparando-as com a figura 3.



## Problema 46.

A composição RhB ( $B_0'B_00'+2'2'+ B_0'B_0'$ ) entrou ao serviço em 2010 e tem as seguintes características principais: Velocidade máxima = 100 km/h; Peso = 950 ton; Potência mecânica nominal agregada dos motores = 2000 kW; Força máxima em regime nominal = 175kN (a 41km/h). Admita 0,96% e 0,98% para os rendimentos dos motores e dos conversores eletrônicos, respectivamente. O consumo nominal para o sistema de climatização (aquecimento) da composição é de 250kW.



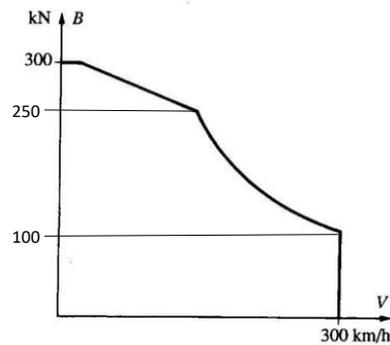
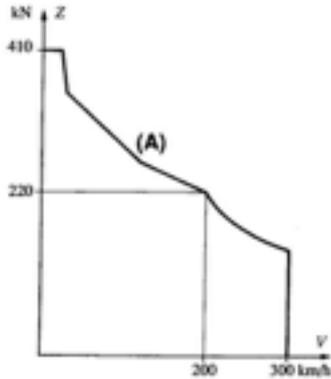
Admita que esta composição circula numa linha com 4,4km de comprimento, alimentada em DC (recorde que para  $U_{nom} = 1000V$  tem-se  $U_{min} = 700V$ ), com uma subestação em cada extremidade (sem feeder). Cada uma das subestações apresenta uma potência máxima de 1,6MW. Considere a secção do fio de contacto igual a  $282mm^2$  e carris de 50kg/m.

1. Admitindo que duas composições iguais se cruzam a meio caminho entre as duas extremidades da linha, a uma velocidade de 36km/h e desenvolvendo, cada uma, uma força de 90kN. Nestas condições qual a corrente que fornece cada subestação.
2. Admitia que uma das estações foi forçada a uma manutenção não programada, sendo que, nestas condições, apenas uma composição pode circular na linha. Não desprezando as perdas associadas ao fio de contacto e aos carris, determine a potência máxima que esta composição pode desenvolver no ponto onde a tensão no fio de contacto se encontra no seu valor mínimo admissível.

## Problema 47.

O comboio EUROSTAR ( $B_0'B_0'+B_0'9x(2')+9x(2')B_0'+B_0'B_0'$ ) é composto por 18 unidades, mais duas automotoras (uma em cada extremidade). As características principais são as seguintes: Velocidade máxima = 300km/h; Peso = 816ton; Força em regime nominal = 220kN (a 200km/h). A resistência ao movimento é dada por  $F=4,82+6,52 \times 10^{-2}V+1,005 \times 10^{-3}V^2$ , com F em kN e V em km/h. Admita um peso médio de 70kg para cada passageiro.

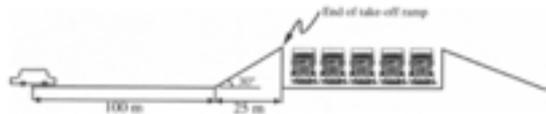
Os gráficos seguintes apresentam, respectivamente, a capacidade de tração e de travagem.



1. Considere o comboio a circular a 300km/h numa reta de inclinação ascendente 3,5‰, e com 800 passageiros a bordo.
  1. Determine a potência necessária para circular nessas condições.
  2. Compare este valor com a potência em regime nominal.
2. Ainda com 800 passageiros a bordo, admita que a composição se desloca ainda a uma velocidade constante de 300km/h, mas agora numa reta de inclinação descendente 25‰.
  1. Qual a potência envolvida nestas condições?
  2. Qual o regime de funcionamento da motorização?
  3. Compare o valor obtido com os limites do comboio.

## Problema 48.

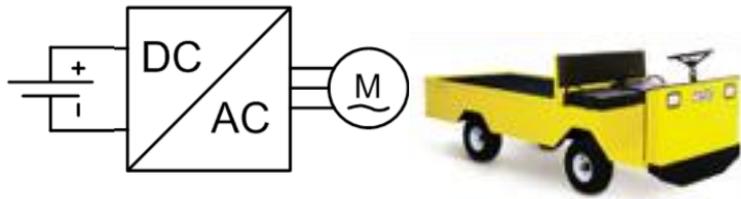
Considere um veículo eléctrico com as seguintes características:  $m=692\text{kg}$ ;  $C_D=0,2$ ;  $A_f=2\text{m}^2$ . O coeficiente de resistência ao rolamento do pneu vale  $f_R=0,015$  (asfalto). Considere o percurso apresentado na figura abaixo e **despreze o atrito com o ar**.



1. Determine a velocidade no final da rampa (em km/h) e o tempo necessário para lá chegar, por aplicação de uma força de tração global constante igual a  $F_x=4500\text{N}$ .
2. Represente o ciclo de funcionamento da velocidade, em km/h, e da potência do veículo, em kW (em função do tempo)
3. Qual a energia necessária (do ponto de vista do veículo) para atingir o final da rampa, em Wh.

## Problema 49.

Considere um transportador eléctrico de muito baixa velocidade, cujo diâmetro das rodas vale 250mm e a massa total 600kg, accionado por um motor de indução trifásico, alimentado conforme o esquema eléctrico junto. O conversor eletrónico de potência apresenta um rendimento de 95%. O veio do motor é conectado aos veios de todas as rodas através de caixas reductoras de velocidade, cujo rendimento vale 80%. O motor tem 2 pares de pólos, potência mecânica igual a 800W, escorregamento nominal igual a 10%, factor de potência igual a 0,8, rendimento igual a 90% e binário máximo igual a 8Nm. O coeficiente de atrito viscoso, **não reduzido ao motor**, vale 815. Considere **apenas** os efeitos do **atrito viscoso**. A tensão da bateria vale 216V.



1. Estando o veículo a deslocar-se nas condições nominais (velocidade constante) e apresentando uma velocidade linear de 0,88m/seg, determine a relação de transmissão da caixa.
2. Nas condições da alínea anterior, determine qual o binário de aplicado pelo motor.
3. Nas condições da alínea anterior, determine qual a potência solicitada à bateria.
4. Qual a corrente média pedida à bateria, nas condições da alínea anterior.
5. Partindo do repouso, qual o tempo necessário para o veículo atingir a velocidade linear de 0,7m/seg, por aplicação do binário máximo, e carregando uma carga de 2000kg. Despreza as dinâmicas inerciais do motor e das caixas reductoras.
6. Qual a energia que é necessário a bateria fornecer, nas condições da alínea anterior.

## Problema 50.

A locomotiva Alstom BB 27000 (Bo'Bo') entrou ao serviço em 2001 e tem as seguintes características principais: Velocidade máxima = 140 km/h; Peso = 90 ton; Potência máxima = 4167 kW; Potência máxima por motor = 1050 kW; 1 conversor electrónico de potência por motor; Alimentação = 3 kV (DC); Força máxima no arranque = 320 kN; Força máxima em regime nominal = 250 kN (a 60 km/h); Força máxima à velocidade máxima = 110 kN; Distância de travagem na horizontal (a 140 km/h) = 970 m; Secção transversal = 12 m<sup>2</sup>.

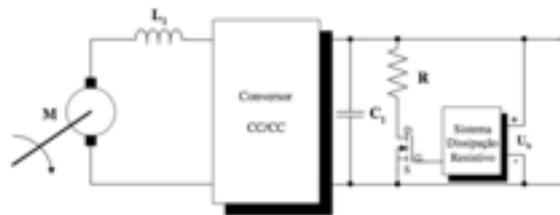
1. Determine a potência de tracção necessária, que a locomotiva tem de utilizar, para rebocar 8 vagões do tipo reboque traseiro (dois eixos, 42 ton e 12 m<sup>2</sup> de área frontal cada), a uma velocidade de 100 km/h em linha recta e plano horizontal. Utilize as fórmulas de Davis.
2. Determine o coeficiente de aderência limite por forma a que toda a composição arranque sem patinagem, quando é utilizada a força máxima de arranque.
3. Determine o rendimento da transmissão mecânica (arredondado às unidades).
4. Considere agora que a locomotiva circula sozinha, numa via simples, com secção do fio de contacto igual a 400 mm<sup>2</sup> e carris de 50 kg/m, num troço de 6 km alimentado por uma única subestação.
  1. Determine a tensão de alimentação, no fio de contacto, no final do troço (oposto à subestação) quando a locomotiva circula utilizando a sua potência máxima.
  2. Considere uma outra locomotiva a circular, a potência constante, no anterior troço de 6 km. Qual o valor máximo desta potência por forma a que não sejam ultrapassados os limites estabelecidos para a queda de tensão.

## Problema 51.

Considere um veículo eléctrico equipado com um motor DC (25CV; 900 rpm; 250V; L desprezável;  $R_a=150\text{m}\Omega$ ) alimentado por um conversor de quatro quadrantes, a operar a 2kHz. Este conversor é alimentado a partir de uma catenária operada a 700 Vdc.

1. Determine o fator de ciclo quando o motor opera em condições nominais.
2. Nas condições anteriores, determine o binário desenvolvido pelo motor, a corrente absorvida e a força electromotriz.
3. Considere que o motor está a rodar a 900rpm quando se inicia um processo de travagem (considere a inércia do motor e a carga elevadas por forma a que a velocidade não possa variar muito rapidamente) por aplicação de uma resistência de travagem de  $20\Omega$  (ver figura). Assuma-se que um binário de travagem igual a 75% do binário nominal é suficiente. Determinar:

1. A tensão aos terminais da resistência de travagem.
2. O fator de ciclo.



## Problema 52.

Considere uma locomotiva (Bo'Bo') que circula sozinha, numa via simples, alimentada a 1500 Vdc, com secção do fio de contacto igual a  $400 \text{ mm}^2$  e carris de  $50 \text{ kg/m}$ . A locomotiva tem as seguintes características principais:

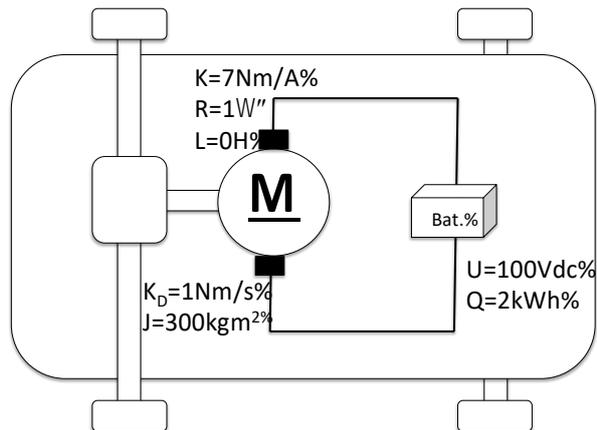
- Velocidade máxima =  $140 \text{ km/h}$
- Peso =  $90 \text{ ton}$
- Potência máxima =  $4167 \text{ kW}$
- Potência máxima por motor =  $1050 \text{ kW}$
- 1 conversor electrónico de potência por motor
- Alimentação =  $25 \text{ kV (50 Hz)}$  ou  $1,5 \text{ kV (DC)}$  Força máxima no arranque =  $320 \text{ kN}$
- Força máxima em regime nominal =  $250 \text{ kN}$  (a  $60 \text{ km/h}$ )
- Força máxima à velocidade máxima =  $110 \text{ kN}$
- Distância de travagem na horizontal (a  $140 \text{ km/h}$ ) =  $970 \text{ m}$
- Secção transversal =  $12 \text{ m}^2$

1. Determine a potência de tracção necessária, que a locomotiva tem de dispender, para rebocar 20 vagões (quatro eixos, dois bogies,  $42 \text{ ton}$  e  $12 \text{ m}^2$  de área frontal cada), à velocidade máxima em linha recta e plano horizontal. Utilize as fórmulas de Davis.
2. Nas condições da alínea anterior determine a máxima aceleração possível (despreze o efeito das massas girantes).
3. Considere que a locomotiva circula sozinha num troço entre duas sub-estações A e B (que distam entre si  $10 \text{ km}$ ), no sentido A->B.
  - 3.1. Determine a queda de tensão média, para uma corrente pedida ao fio de contacto de  $2 \text{ kA}$ .
  - 3.2. Admita que a  $4 \text{ km}$  da sub-estação A a locomotiva desenvolve uma potência mecânica igual a  $2000 \text{ kW}$ . Admitindo um rendimento global de  $95,079\%$  para os blocos electrónicos de potência, motores de tracção e transmissão mecânica, determine a tensão de alimentação nesse ponto.
  - 3.3. Nas condições da alínea anterior determine a potência entregue por cada uma das sub-estações (A e B).
4. Considere agora que a locomotiva circula no sentido A->B, e que a subestação B se encontra em manutenção. Nestas condições a locomotiva ficará sujeita a uma limitação de potência. Identifique o ponto do troço A-B onde essa limitação será maior. Considerando o mínimo de tensão de funcionamento admissível -  $1000 \text{ Vdc}$ , determine a potência mecânica máxima que a locomotiva pode desenvolver nesse ponto de maior limitação.

## Problema 53.

Considere o seguinte transportador mecânico (movendo-se em plano horizontal) de baixa velocidade, onde se despreza o atrito com o ar, accionado por um motor de corrente contínua de excitação independente constante. Determine:

1. A velocidade do motor de regime permanente, por aplicação da tensão nominal.
2. O tempo de estabelecimento desta velocidade (5% do se valor final).
3. A autonomia temporal do transportador.



## Problema 54.

Considere uma locomotiva com 87 toneladas, a potência eléctrica de cada motor vale 250 kW, a relação de transmissão mecânica 1:3,52 e a secção frontal  $12\text{m}^2$ .

Considere uma linha com alimentação DC (3000 V), em que cada troço de 60 km é alimentado por duas sub-estações nas extremidades (com ligação paralela na meia distância), e com uma resistência kilométrica de  $0,065 \Omega/\text{km}$ . Notar que numa linha alimentada a 3000 Vdc o mínimo de tensão admissível é 2000 Vdc.

Em cálculos onde se considere o comboio no seu todo, considere para a massa total corrigida devida às massas inerciais o coeficiente  $\xi=1,1$ .

O coeficiente de aderência é dado pela seguinte fórmula (com  $v$  em km/h):

1. Determine o rendimento do conjunto motor/transmissão mecânica.
2. Classifique a locomotiva, quanto aos seus eixos.
3. Admita que à locomotiva estão acoplados um conjunto de vagões de 20 toneladas cada (2 eixos) e secção frontal de  $12\text{m}^2$ . Admitindo condições de regime permanente, qual o número máximo de vagões que podem ser rebocados à velocidade de 92 km/h.
4. Nas condições de esforço máximo e para uma velocidade de 18 km/h, determine a corrente eléctrica pedida ao fio de contacto. Despreze as perdas electrónicas e admita rendimentos constantes.
5. Sabe-se que, no arranque da locomotiva sozinha, ao aplicar a força de tracção máxima a mesma se encontra no limite da aderência. Determine a constante  $k$  na fórmula do coeficiente de aderência.
6. Considere que o comboio se desloca a uma velocidade de 60 km/h não rebocando nenhum vagão. Aplicando a força máxima de travagem possível (evitando patinagem) determine o espaço necessário para a composição parar.
7. Considerando que um comboio rebocado pela locomotiva circula num dos troços da linha. Verifique se a locomotiva está sujeita a restrições de potência no referido troço.

