

# Locomotivas de Minas

## Equações de cálculo e características de funcionamento

Carlos Manuel Pereira Cabrita (\*)

### abstract

*The design formulas and operating characteristics of the electric locomotives for freight service in mines, are deduced and analysed.*

### resumo

Apresentam-se neste artigo as equações de cálculo bem como as respectivas características de funcionamento, de locomotivas eléctricas de serviço pesado, em minas.

### Simbologia

- $a$  — distância entre eixos da locomotiva, m
- $C$  — carga total rebocada, t
- $e$  — bitola da via, m
- $i$  — inclinação da via, ‰
- $M$  — carga total rebocada, por eixo da locomotiva, t
- $P$  — peso por eixo, da locomotiva, t
- $P_m$  — potência nominal de cada motor de tracção, kW
- $R$  — resistência ao movimento, kg/t
- $R_T$  — resistência total ao movimento, kg/t
- $r$  — raio de curvatura, m
- $V$  — velocidade, km/h
- $Z$  — força de tracção por eixo da locomotiva, kg
- $\eta$  — rendimento mecânico da transmissão
- $\mu$  — coeficiente de aderência

### 1. Introdução. Breves considerações sobre locomotivas de minas

Com a crescente automatização das explorações mineiras tem vindo a adquirir cada vez maior importância a questão relacionada com a problemática dos meios de transporte nas galerias, sobretudo no que respeita à sua economia e à sua segurança. Uma vez que os declives são normalmente pequenos, da ordem dos 2,5 ‰, resulta ser a locomotiva o meio de tracção mais apropriado. As vantagens das locomotivas eléctricas residem na sua elevada segurança e fiabilidade de funcionamento, bem como na sua notável maleabilidade, evitando interrupções prolongadas durante as operações de transporte. Com a finalidade de se conseguir um dimensionamento técnico e economicamente mais favorável, é necessário que os serviços de exploração mineira especifiquem, o mais detalhadamente possível, todos os dados disponíveis sobre as condições de trabalho. Há que saber a tonelagem a transportar em cada turno de trabalho, qual a bitola da via, qual a sua inclinação e qual o menor dos raios de

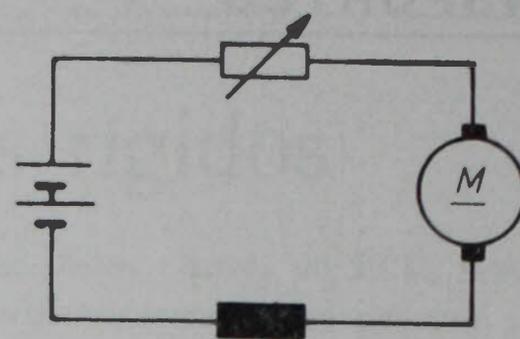
(\*) Carlos Manuel Pereira Cabrita, Dr. Eng. Electrotécnico (IST). Prof. Auxiliar do IST.

curvatura. O rendimento económico das locomotivas e da exploração mineira será tanto melhor, quanto mais racional for a distribuição do transporte, sendo de evitar paragens prolongadas e sobrecargas frequentes.

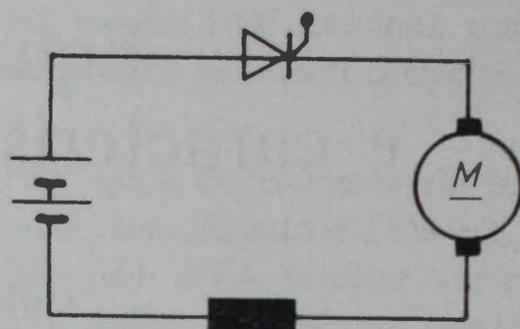
Deste modo, são necessários os seguintes dados para que o dimensionamento das locomotivas se possa efectuar o mais correctamente possível:

- Bitola da via, normalmente situada entre 500 mm e 1000 mm.
- Perfil dos carris.
- Tipo de linha — simples ou dupla.
- Raio mínimo de curvatura, que normalmente se situa entre 10 m e 20 m.
- Classe de tracção — por catenária, por baterias, ou combinada.
- Tensão de regime.
- Comprimento, largura e altura das locomotivas.
- Número de turnos por dia.
- Carga total a transportar em cada turno.
- Declive máximo da via, normalmente não superior a 2,5 ‰.
- Comprimento da linha a ser percorrida com baterias e com catenária.
- Tipo de catenária — um ou dois fios.
- Velocidade máxima, normalmente inferior a 30 km/h.
- Peso por eixo admissível pela linha. Depende do tipo de carril, do modo de fixação e da distância entre travessas, estando o seu valor normalmente compreendido entre 2 t e 10 t.

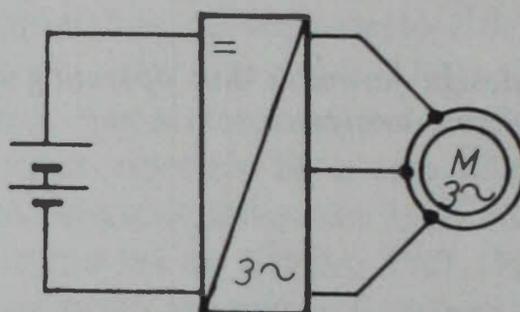
As locomotivas para serviço de transporte de minério em galerias são normalmente dimensionadas com dois eixos, ambos motrizes (Classe A — A). Na figura 1 expõem-se os esquemas eléctricos de princípio das referidas locomotivas, com alimentação em corrente contínua por meio de baterias. A alimentação pode igualmente ser feita através de catenária. De acordo com [3], as locomotivas com alimentação por catenária devem ser utilizadas sempre que seja possível, pois não dependem da carga das baterias estando sempre aptas para o serviço. No entanto, a concentração de partículas no interior da galeria não deve ultrapassar 0,3 ‰ e o ar deve circular a uma velocidade mínima de 1 m/s. Ao dimensionarem-se estas locomotivas, há que ter em atenção que os pantógrafos têm uma altura normalizada de cerca de 400 mm. Quanto às locomotivas com alimentação por baterias, são utilizadas quando o espaço disponível não permite a instalação de catenária. O seu cálculo deve ser efectuado de



Controlo reostático motor CC



Controlo por chopper motor CC



Controlo por ondulator motor CA

Fig. 1 — Esquemas de princípio das locomotivas de minas

modo a que as baterias não necessitem serem carregadas durante um turno de serviço (usualmente 6 horas).

Para finalizar, indicam-se as características principais de uma locomotiva de minas de construção recente [1], e que são as seguintes:

- Alimentação por catenária: 250 V CC.
- Tipo de serviço: mina de carvão.
- Peso: 20 t.
- Bitola da via: 750 mm.
- Número de rodados: 2.
- Motores de tracção: 2, tipo série em CC, com uma potência unihorária de 47 kW.
- Tipo de controlo: chopper.
- Força de tracção no arranque: 5800 kg.
- Velocidade máxima: 25 km/h.

## 2. Equações de cálculo e características de funcionamento

### 2.1. Potência dos motores de tracção

Conhecendo-se a força de tracção em cada rodado da locomotiva, a velocidade de regime, e o rendimento mecânico da transmissão, calcula-se a potência de cada motor através da expressão

$$P_m = \frac{ZV}{360\eta}$$

Para que não haja patinagem das rodas motrizes, a força máxima de tracção por eixo está relacionada

com o peso por eixo da locomotiva do seguinte modo:

$$Z = 1000\mu P$$

Quanto ao coeficiente de aderência, devem ser adoptados os seguintes valores [3]

V (km/h)	$\mu$
0	0,250
5	0,220
10	0,205
15	0,185
20	0,180
25	0,175
30	0,168

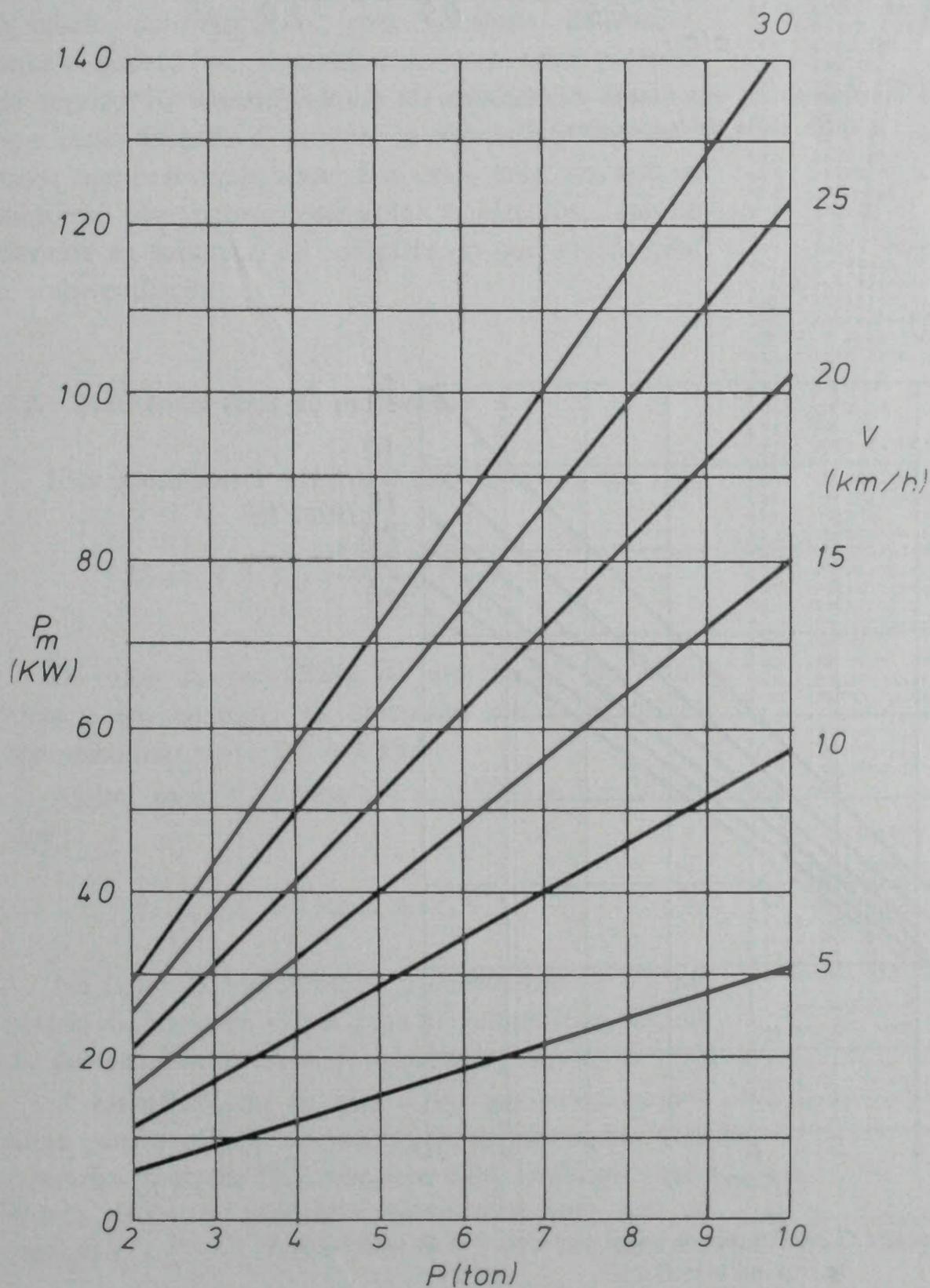


Fig. 2 — Potência nominal por eixo  $P_m$  em função do peso por eixo  $P$  e da velocidade  $V$

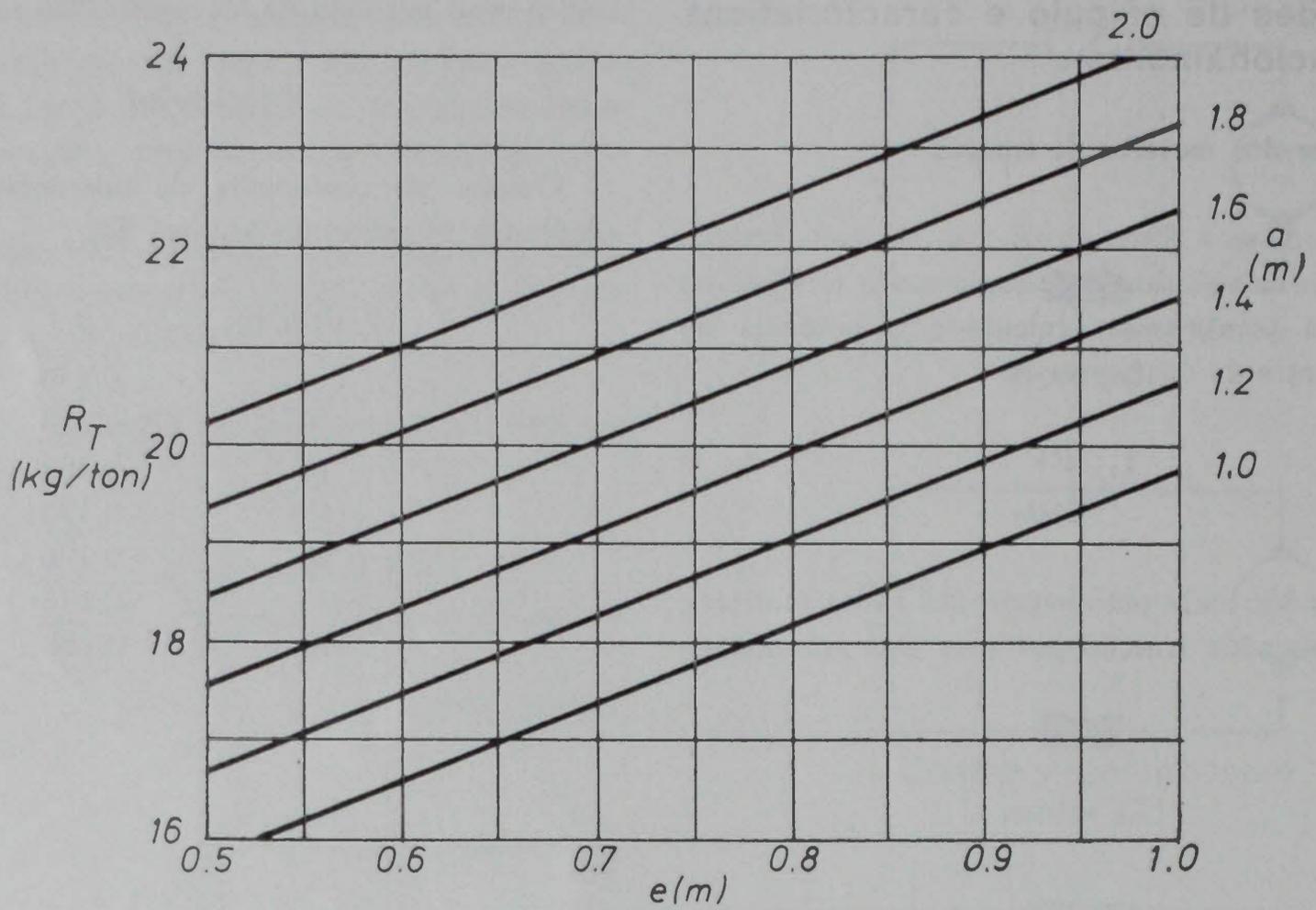


Fig. 3 — Resistência total ao movimento  $R_T$  em função da bitola da via  $e$  e da distância  $a$  entre eixos da locomotiva

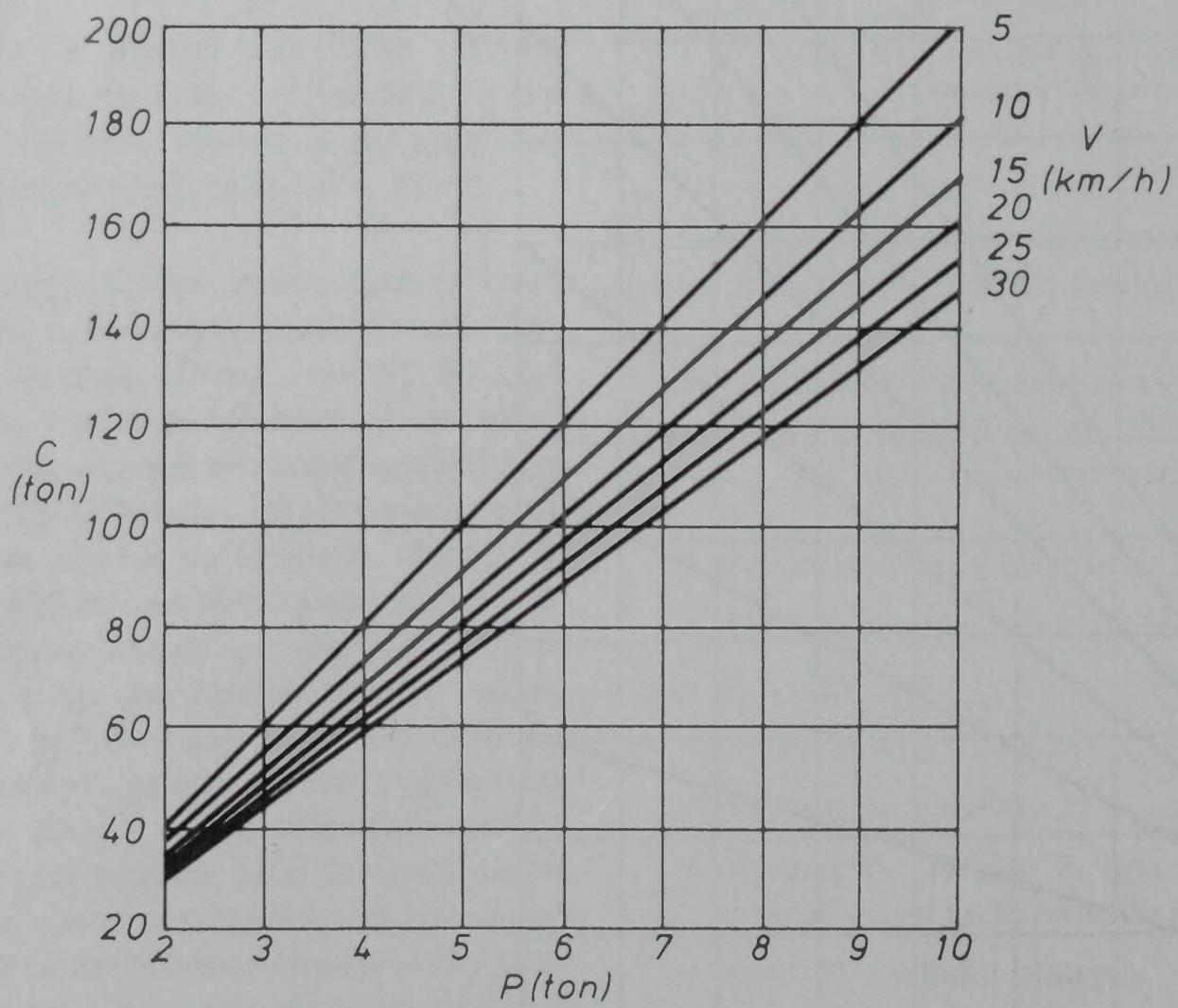


Fig. 4 — Carga total rebocada  $C$  em função da carga por eixo  $P$  e de velocidade  $V$  ( $a = 1$  m,  $e = 1$  m)

que seguem aproximadamente a seguinte lei:

$$\mu = 0,250 \frac{1+0,032V}{1+0,064V} = 0,250 \frac{8+0,256V}{8+0,512V}$$

Assim sendo, ter-se-á finalmente, se se atender ainda a que  $\eta=0,98$ ,

$$P_m = 0,709 \frac{1+0,032V}{1+0,064V} PV \quad (1)$$

Na figura 2 representa-se o andamento da potência nominal de cada motor,  $P_m$ , em função do peso por eixo da locomotiva,  $P$ , para os valores usuais de velocidade  $V$  praticados neste tipo de serviço.

Como os motores de tracção devem ser blindados, a sua ventilação deve ser independente, para que a evacuação do calor seja a mais eficaz possível. Comparando um motor de ventilação forçada com um motor blindado auto-ventilado, com idênticas dimensões, aquele poderá ser dimensionado com uma potência de serviço 10% a 15% mais elevada. Além disso, a ventilação forçada é sempre de aconselhar para serviços muito severos, como é o caso, uma vez que os motores são permanentemente arrefecidos, mesmo durante as paragens, ao contrário do que sucede com a auto-ventilação.

## 2.2. Resistência total ao movimento

Esta resistência é dada pela expressão clássica [3],

$$R_T = R + i + \frac{158e + 88a}{r}$$

O valor da resistência ao movimento em linha recta e em patamar,  $R$ , apresenta um valor médio compreendido entre 3,5 e 6 kg/t.

Assim, para  $R = 5$  kg/t,  $i = 2,5$  ‰ e  $r = 20$  m, virá

$$R_T = 7,5 + 7,9e + 4,4a \quad (2)$$

Na figura 3 representa-se o andamento de  $R_T$  em função da bitola da via,  $e$ , para os valores mais usuais da distância entre eixos da locomotiva,  $a$ .

A resistência do ar, que é um parâmetro importante para o cálculo da resistência ao movimento dos comboios normais [2], não tem aqui qualquer significado dadas as reduzidas velocidades com que se trabalha.

```

10 REM Programa LOCOSMINAS
20 REM - DETERMINACAO DOS PARAMETROS DE CALCULO -
30 REM - DE LOCOMOTIVAS ELECTRICAS DE MINAS A-A -
40 PRINT "SAIDA DE RESULTADOS (O-ECRAN , 1-IMPRESSORA) ?"
50 INPUT S
60 PRINT "QUAL E A INCLINACAO MAXIMA DA VIA (m/km) ?"
70 INPUT I
80 PRINT I
90 IF I>3 THEN
100 BEEP 1200,.3
110 PRINT " ERRO : inclinacao superior a 3 m/km"
120 GOTO 60
130 END IF
140 PRINT "QUAL E O RAI0 DE CURVATURA (m) ?"
150 INPUT R
160 PRINT R
170 PRINT "QUAL E A BITOLA DA VIA (m) ?"
180 INPUT B
190 PRINT B
200 IF B>1 THEN
210 BEEP 1200,.3
220 PRINT " ERRO : bitola superior a 1 m"
230 GOTO 170
240 END IF
250 PRINT "QUAL E A CARGA MAXIMA POR EIXO (ton) ?"
260 INPUT P
270 PRINT P
280 IF P>10 THEN
290 BEEP 1200,.3
300 PRINT " ERRO : carga maxima superior a 10 ton"
310 GOTO 250
320 END IF
330 PRINT "QUAL E A DISTANCIA ENTRE EIXOS (m) ?"
340 INPUT D
350 PRINT D
360 IF D>2 THEN
370 BEEP 1200,.3
380 PRINT " ERRO : distancia entre eixos superior a 2 m"
390 GOTO 330
400 END IF
410 IF D<1 THEN
420 BEEP 1200,.3
430 PRINT " ERRO : distancia entre eixos inferior a 1 m"
440 GOTO 330
450 END IF
460 PRINT "QUAL E A VELOCIDADE (km/h) ?"
470 INPUT V
480 PRINT V
490 IF V>30 THEN
500 BEEP 1200,.3
510 PRINT " ERRO : velocidade superior a 30 km/h"
520 GOTO 460
530 END IF
540 !
550 A=(1+.032*V)/(1+.064*V)
560 U=.250*A
570 Pm=.709*A*P*V
580 Rt=5+I+(158*B+88*D)/R
590 C=2*(250*A/Rt-1)*P
600 IF C<40 THEN
610 BEEP 1200,.3
620 PRINT " "
630 PRINT " ATENCAO : rever dados especificados"
640 GOTO 60
650 END IF
660 J=P/.48/(P*C/2)+Rt/120
670 !
680 IF S=0 THEN PRINTER IS 1
690 IF S=1 THEN PRINTER IS 701
700 PRINT " VALORES ESPECIFICADOS : "
710 PRINT "inclinacao da via(m/km)=";I
720 PRINT "raio de curvatura(m)=";R
730 PRINT "bitola da via(m)=";B
740 PRINT "carga maxima por eixo(ton)=";P
750 PRINT "distancia entre eixos(m)=";D
760 PRINT "velocidade(km/h)=";V
770 PRINT " "
780 PRINT " VALORES CALCULADOS : "
790 PRINT "aderencia=";U
800 PRINT "potencia por eixo(KW)=";Pm
810 PRINT "resistencia ao movimento(kg/ton)=";Rt
820 PRINT "carga maxima rebocavel(ton)=";C
830 PRINT "aceleracao maxima no arranque(m/s2)=";J
840 PRINTER IS 1
850 END

```

EXEMPLO :

```

VALORES ESPECIFICADOS :
inclinacao da via(m/km)= 2,5
raio de curvatura(m)= 15
bitola da via(m)= 1
carga maxima por eixo(ton)= 8
distancia entre eixos(m)= 1,5
velocidade(km/h)= 15

```

```

VALORES CALCULADOS :
aderencia= .188775510204
potencia por eixo(KW)= 64.2440816327
resistencia ao movimento(kg/ton)= 26.8333333333
carga maxima rebocavel(ton)= 96.5617949043
aceleracao maxima no arranque(m/s2)= .0725225225225

```

Fig. 5 — Listagem do programa de computação dos parâmetros de cálculo das locomotivas

### 2.3. Carga total rebocada

Em regime permanente, a força máxima de tracção por eixo da locomotiva, sem que patinhe, é igual à carga máxima rebocável, ou seja,

$$1000\mu P = (P + M) R_T$$

Tendo em atenção a expressão de  $\mu$ , virá para a carga máxima rebocada, por eixo da locomotiva, a seguinte expressão:

$$M = \left( 250 \frac{1+0,032V}{1+0,064V} \frac{1}{R_T} - 1 \right) P$$

Por conseguinte, para locomotivas da classe A — A (2 rodas motrizes), como é habitual, a carga total rebocável será

$$C = 2 \left( 250 \frac{1+0,032V}{1+0,064V} \frac{1}{R_T} - 1 \right) P \quad (3)$$

Na figura 4 representa-se o andamento de  $C$  em função do peso por eixo  $P$  e da velocidade  $V$ , para uma locomotiva A - A com uma distância entre eixos de 1 m, para uma bitola de via de 1 m.

### 3. Conclusões

Deduziram-se assim as fórmulas principais de cálculo de locomotivas para serviço pesado de mercadorias, em galerias de explorações mineiras, traduzindo-se essas mesmas fórmulas pelas respectivas características gráficas de funcionamento. De salientar que a filosofia de dimensionamento destas locomotivas eléctricas, também vulgarmente denominadas por loco-tractores dada a especificidade das suas funções, difere da que preside ao cálculo das locomotivas para via normal [2].

Apresenta-se ainda na figura 5 um pequeno programa, elementar, para a computação dos parâmetros de cálculo das locomotivas, escrito em linguagem BASIC.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASEA JOURNAL 5, 1977.
- [2] C. Cabrita, R. Simões — *Abacos de cálculo de locomotivas eléctricas*. Electricidade n.º 258 (Jul. 89), P. 347-352.
- [3] F. Rex — *Locomotoras de minas, de alimentacion por hilo de contacto, bateria, combinada y mediante tambor de cable*. *La electrotecnia en la traccion*, AEG, 1956, p. 118-133.

## CAMINHOS DE FERRO ■ CAMINHOS DE FERRO ■ CAMINHOS DE FERRO

# Unidades duplas para a C. P.

Da estação da Trindade, no Porto, partem duas linhas em direcção ao Norte: uma para Fafe, passando por Guimarães, e outra para a Póvoa de Varzim, continuando para Famalicão e ligando com a primeira na Trofa.

São linhas de via reduzida, métrica, e foram construídas no princípio do século pela extinta Companhia dos Caminhos-de-Ferro do Norte de Portugal. Hoje têm características suburbanas e correspondem, até certo ponto, às linhas de Cascais e de Sintra, em Lisboa, embora com extensão quatro vezes superior e tráfego muito inferior. É para o tráfego de características suburbanas da linha da Póvoa de Varzim que a CP encomendou à Sorefame sete unidades duplas automotoras, com capacidade para

225 passageiros sendo 109 sentados.

Cada unidade é constituída por uma carruagem motora (Bo'2') e uma carruagem rebocada, ambas com cabina de comando. As motoras são diesel-eléctricas, equipadas com um grupo diesel-alternador de 285 kW que acciona dois motores de tracção trifásicos assíncronos, no mesmo bogie. A corrente trifásica produzida no gerador é rectificadora e alisada por meio de uma rede de diodos e condensadores; a corrente contínua obtida é transformada, com auxílio de um sistema electrónico de controlo, em corrente trifásica de tensão e frequência regulável em função das necessidades de operação dos motores de tracção, em termos de binário e velocidade, independen-

temente da velocidade e binário do motor diesel.

A motora dispõe assim de uma espécie de caixa de velocidades eléctricas, de variação contínua. Como está prevista a electrificação da linha da Póvoa, dentro de alguns anos, estas unidades diesel ficarão preparadas para serem economicamente transformadas em unidades eléctricas.

De notar que são as primeiras carruagens de via métrica fabricadas pela Sorefame e as primeiras de via reduzida fabricadas para a CP. As carruagens para Angola e Moçambique eram de via reduzida inglesa, 3 pés e 6 polegadas.

O principal subfornecedor da Sorefame neste trabalho é o novo grupo ABB.

O valor global desta nova encomenda da Sorefame, atinge aproximadamente a quantia de três milhões de contos.

*Informação: Sorefame.*