

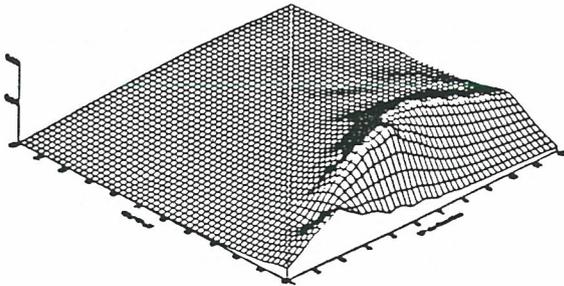


Departamento de  
Minas  
da Faculdade de Engenharia  
da Universidade do Porto

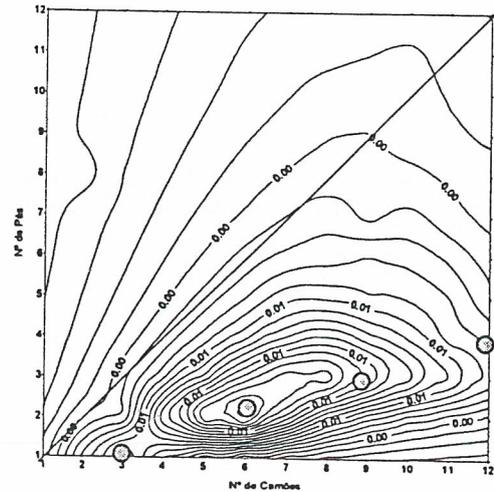
# Análise de Sistemas de Carga e Transporte: Uma abordagem determinística

por

Henrique S. B. Miranda e Alexandre J. M. Leite



*Produtividade*



AIPGN - III Jornadas Técnicas - 1996

IGM - PORTO

# Análise de Sistemas de Carga e Transporte: Uma abordagem determinística

por

Henrique S. B. Miranda e Alexandre J. M. Leite  
FEUP - Dep. Minas

## Objectivo

O trabalho que agora se apresenta pretende divulgar parte dos resultados de uma linha de investigação no âmbito da análise de Sistemas de Carga, Transporte e Armazenamento que se encontra em desenvolvimento no Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Encontrando-nos na posse de alguns algoritmos de simulação de tais sistemas (adequados a explorações a céu aberto) que, para além da sua utilidade técnica, possuem certo valor heurístico possibilitador de clarificação de conceitos muitas vezes não detectáveis por observação dos sistemas industriais, achamos importante a sua divulgação.

Dada a simplicidade de um desses algoritmos e a sua possível imediata aplicabilidade às explorações industriais ou mesmo ao nível do projecto, decidimo-nos a apresentá-lo não deixando de referir que este se encontra em fase de aperfeiçoamento.

Numa primeira parte serão abordados os principais fundamentos conceptuais e suportes matemáticos do modelo. E, com base num exemplo simples, tentaremos reflectir sobre um conjunto de conceitos que consideramos fundamentais para a compreensão e domínio do desempenho do sistema.

Na fase final, ensaiaremos uma validação dos resultados do presente modelo baseada no confronto com os resultados de um modelo probabilístico já fortemente testado, realçando-se alguns pormenores comuns apesar da natureza conceptualmente distinta dos modelos em apreço.

## Considerações prévias e fundamentação do modelo

O dimensionamento de frotas de carga e transporte assenta tradicionalmente numa condição de balanceamento entre unidades de carga e transporte a estabelecer mediante o sincronismo de operação, entendendo este como o modo organizativo que garantiria que jamais uma unidade de transporte averbasse esperas junto de uma unidade carregadora. Por outras palavras, no desempenho de um tal sistema (perfeito, porque síncrono) haveria sempre uma unidade de transporte em curso de carregamento. Nestas condições, gerar-se-ia um fluxo contínuo de material entre unidades carregadoras e transportadoras, implicando igualdade entre produção realizável por cada pá carregadora e a capacidade de produção da frota de unidades transportadoras por ela servida. Quer dizer:

$$Cp \frac{1}{TCM(P)} Rp = Nc Cc \frac{1}{TCM(C)} Rc$$

$$Rp = Rc = 100\%$$

$$Cc = n Cp$$

$$Nc = \frac{TCM(C)}{n TCM(P)} = \frac{TCM(C)}{TC} (*)$$

Cp - Capacidade da colher das Pás

Cc - Capacidade das caixas dos Camiões

Rp - Rendimento ou Índice de Utilização das Pás

Rc - Rendimento ou Índice de Utilização dos camiões

Nc - Número de camiões

n - Número de ciclos elementares da pá necessários para encher um camião

TCM(P) - Tempo de ciclo mínimo da pá

TCM(C) - Tempo de ciclo mínimo dos camiões

TC - Tempo de carga

Neste esquema de cálculo, admite-se que os rendimentos são unitários porque, caso contrário, um dos equipamentos (a unidade carregadora ou a frota de unidades transportadoras) averbaria tempos perdidos ao longo dos respectivos ciclos de actividade.

Tudo dependendo dos valores de TCM(C) e de TC, o valor de Nc fornecido por (\*) pode não ser inteiro. Em geral não o é, pelo que a necessidade de assegurar a produção desejada obriga fatalmente à adopção do inteiro imediatamente superior a Nc como dimensão mínima da frota de transporte. Mas, nestas condições, diz-nos a mesma relação (\*) que, ao adoptar  $N'c > Nc$  surge imediatamente um novo valor do tempo de ciclo, um tempo de ciclo efectivo TCE(C) maior que TCM(C).

Quer dizer, mesmo admitindo a hipótese de que seriam perfeitamente controláveis todos os factores que tornam variáveis os tempos de actividade e que, portanto, o sistema funcionaria com regularidade metronómica, nem mesmo assim se eliminariam os tempos de inactividade (tempos de perda em esperas). Esta inevitabilidade decorre do facto de que equações do tipo (\*) põe em confronto dois tipos de variáveis: os tempos, que são variáveis contínuas, e as dimensões das frotas de carga e transporte (Nc e Np), cujas são variáveis discretas.

O nosso enfoque do problema caracteriza-se pelo abandonar do simplismo traduzido na admissão de valores unitários para rendimentos dos equipamentos: admitimos, portanto, que estes possam ser quaisquer ( $Rp \leq 1$ ,  $Rc \leq 1$ ,  $Rp \neq Rc$ ); e, por outro lado, se por produção entendermos a quantidade de material que num dado lapso de tempo (um relevo de duração TR = 7 horas, por exemplo) pode ser carregado, transportado e descarregado por acção conjugada de Nc unidades de transporte e Np unidades de carregamento, uma coisa é obvia: a produção realizada pelas Np pás durante o relevo é necessariamente igual à produção de Nc camiões durante o mesmo lapso de tempo. Por outras palavras, a igualdade que gera a relação (\*) escrever-se-á então

$$Qp = Qc$$

$$Cc \frac{Np Tr}{TCM(P)} Rp = Cc \frac{Nc Tr}{TCM(C)} Rc$$

$$Rp = \frac{TCM(P)}{TCE(P)}$$

$$Rc = \frac{TCM(C)}{TCE(C)}$$

$$\frac{Nc}{Np} = \frac{TCE(C)}{TCE(P)} \quad (**)$$

expressão que constitui a relação fundamental de equilíbrio de um sistema de carga e transporte.

Para uma dada produção previamente estipulada  $Q = Q(P) = Q(C)$ , exprimível mediante as duas equações

$$Q(p) = Cc \frac{NpTr}{TCE(P)}$$

$$Q(c) = Cc \frac{NcTr}{TCE(C)}$$

há que determinar quatro grandezas à partida desconhecidas: Nc, Np, TCE(C) e TCE(P). Perante a escassez de equações para o número de incógnitas em presença, só resta um recurso com vista à fuga a esquemas de cálculo por tentativa-e-erro: a montagem de uma rotina de cálculo iterativo capaz de:

- fornecer os valores mínimos de Nc e Np para a produção Q pretendida
- destrinçar os valores concretos de TCE(C) e TCE(P) dentre a infinidade de pares de valores de TCE(C) e TCE(P) capazes de satisfazer a relação (\*\*) - os tempos de ciclo são variáveis contínuas, não esquecer.

### Caracterização sucinta do sistema simulado

Consiste em um conjunto de pás carregadoras e de camiões que, operando em dada pedreira ou exploração mineira a céu aberto, asseguram a transferência de um certo volume (Q) de material diariamente gerado numa frente de desmonte para uma tolva de capacidade ilimitada (pilha ou “stack”).

Como tempos de actividade produtiva e não produtiva (esperas) das unidades móveis intervenientes, há a considerar os seguintes.

Pás carregadoras:

TC - Tempo de Carga: o tempo necessário para efectuar a carga completa de um camião de capacidade Cc.

Sendo Cp a capacidade da colher da pá carregadora, o enchimento da caixa do camião exige  $n = Cc / Cp$  ciclos mínimos ( $t_{c\min}$ ) da pá carregadora:

$$TC = n t_{c\min}$$

TA - Tempo de Arrumação: tempo despendido por cada pá, à cabeça da operação de carga propriamente dita, na recollecção e ajeitamento do escombro e no afastamento de blocos (matações) de dimensões proibitivas, tendo em vista proporcionar uma execução tão pouco perturbada quanto possível dos n ciclos elementares ( $t_{c\min}$ ) de carregamento.

TEP - Tempo de Espera das Pás: tempo de inactividade decorrente da eventualidade de, após a efectuação da Arrumação, não haver ainda qualquer camião aguardando carga. Será, por conseguinte, o lapso de tempo decorrido entre o final da Arrumação e o instante em que um camião se apresenta para a carga.

$$TCE(P) = TC + TA + TEP$$

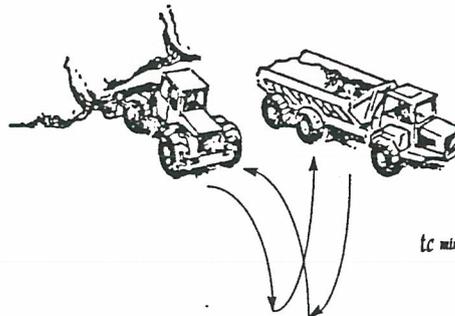
### Sub-Sistema de Carga

$$TC = n \cdot t_{c\min}$$

$$n = Cc / Cp$$

TA = Tempo de Arrumação

TEP = Tempo de Espera



Camiões:

TC - tempo de carga: já referido, é um tempo comum ao ciclo da pá e do camião, na medida em que a operação de carga constitui o elo físico de ligação entre os Sub-sistemas de Carga e de Transporte.

TI - Tempo de Ida do camião à descarga: tempo de viagem entre a frente de desmonte e uma vizinhança imediata da tolva (pilha).

TECD - Tempo de Espera do Camião na Descarga: a inevitabilidade da ocorrência de esperas no desempenho de sistemas reais pode determinar a formação de filas de espera junto da tolva (mormente se esta for tal que, embora com capacidade infinita, não consinta a descarga simultânea de várias unidades transportadoras)

TV - Tempo de Volta do camião à frente de desmonte: tempo de viagem entre a tolva e uma vizinhança imediata do local de carregamento.

TECP - Tempo de Espera do Camião na Carga: tempo de espera decorrente da eventualidade de formação de filas-de-espera de camiões junto da pá carregadora.

$$TCE(C) = TC + TI + TECD + TD + TV + TECP$$

Uma vez que o modelo determinístico não permite a destrição entre tempos TECD e TECP, estes serão designados globalmente por  $AATC(C) = TECD + TECP$ , acréscimos absolutos do tempo de ciclo do camião. Quer dizer,

$$TCE(C) = TC + TI + TD + TV + AATC(C) = TCM(C) + AATC(C)$$

Analogamente, faremos, para as pás carregadoras,  $TEP = AATC(P)$ , acréscimos absolutos do tempo de ciclo das pás. Deste modo,

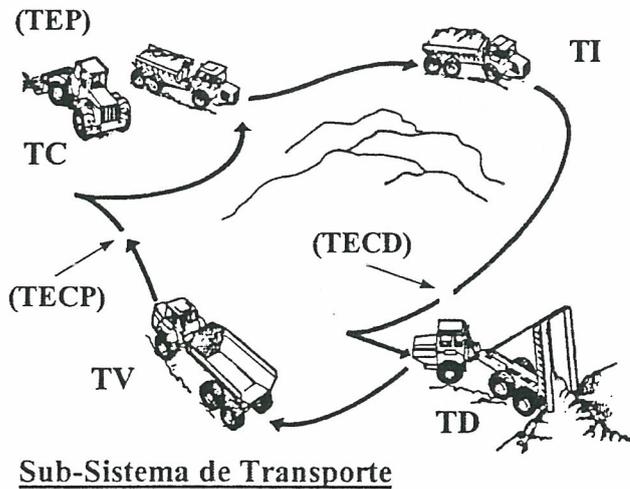
$$TCE(P) = TCM(P) + AATC(P)$$

### Índices de Desempenho

Com o objectivo de acompanhar o desempenho do sistema invocam-se os dois índices de utilização  $IU(C)$  e  $IU(P)$  coincidentes na sua definição com a noção clássica de Rendimento das pás e dos camiões.

$$IU(C) = RC = \frac{TCM(C)}{TCE(C)}$$

$$IU(P) = RP = \frac{TCM(P)}{TCE(P)}$$



## O Algoritmo Recorrente

O algoritmo que representa o sistema apresentado é de carácter recorrente no sentido de que, por aproximações sucessivas nos encaminhamos para uma situação desejável. Vejamos como se processa a recorrência:

- A partir de uma produção estipulada (Q) e da capacidade do camião (Cc), determina-se o número total de cargas necessárias para realizar aquela produção ( $NCN = Cc/Cp$ ) e, com base neste valor, inferem-se as quantidades fictícias (porque não inteiras, em geral) de camiões (Nc) e das pás carregadoras (Np) necessárias para o efeito. Para os valores iniciais  $Nc(0)$  e  $Np(0)$ , verifica-se exactamente a relação

$$\frac{Nc(0)}{Np(0)} = \frac{TMC(C)}{TMC(P)} = \frac{TCE(C)0}{TCE(P)0}$$

- Passa-se seguidamente a valores de Nc e Np iguais aos inteiros imediatamente superiores, respectivamente, a  $Nc(1)$  e a  $Np(1)$ , o que implica que a relação anterior deixa de verificar-se, convertendo-se numa relação da forma genérica (\*\*)
- Surge, conseqüentemente, a necessidade de calcular  $TCE(C)$  e  $TCE(P)$ , o que somente pode fazer-se de modo recursivo. Todo o algoritmo está estruturado neste sentido.
- Obtidos, em cada iteração, os valores dos ciclos efectivos, ficamos habilitados (por invocação de  $NCN$ , grandeza cujo valor se mantém obviamente constante ao longo de todo o cálculo recorrente) a determinar novos valores fictícios  $Nc(2)$  e  $Np(2)$  (em geral maiores que os antecedentes) os quais, quando não inteiros, por sistema substituímos pelos inteiros imediatamente superiores.
- Repete-se este procedimento tantas vezes quantas as necessárias para que resulte nula a diferença ( $Q(C) - Q(P)$ ) entre as produções realizáveis, com os ciclos em cada iteração calculados, pelos camiões e pelas pás. Neste momento, os valores dos ciclos efectivos estão ajustados, isto é, são tais que verificam exactamente a relação (\*\*) com Nc e Np assumindo valores inteiros finais.

O algoritmo resultante possui estrutura extremamente simples, caracterizando-se por grande rapidez de convergência e elevada precisão dos resultados finais.

## Implementação do Algoritmo

Esta metodologia de análise foi por nós implementada sobre um “folha de cálculo”, recorrendo à programação “macro” para facilitar quer o cálculo recorrente, quer a elaboração de tabelas e gráficos.

DADOS	
TCM(C)	1056,200
TCM(P)	364,400
n	8
TR	25200
Q	1995
Cc	6
Cp	0,75
TC	334,4
TI	400,68
TD	62,3607
TV	258,759
TA	30
tc <sub>min</sub>	41,8

Um bloco de entrada de dados permite a inserção de valores de Tempo de Relevância (TR), de produção desejada (Q), de tempos de tarefa e capacidades de camiões e pás. Com base no Tempo de Ciclo Mínimo ( $tc_{min}$ ) da operação de carga, é determinado o Tempo de Carga (TC) respectivo. Os Tempos de Ciclo Mínimo das pás e camiões são imediatamente calculados e disponibilizados para os cálculos recorrentes.

Uma primeira tabela resumida de resultados aparece com o formato que se pode observar na figura, sendo de destacar nesta os valores de  $N_p$  e  $N_c$  que permitem obter a produção estipulada à partida.

RESULTADOS			
NP	2	TCE(P)	405,906
NC	6	TCE(C)	1217,72
		IU(C)	86,736
		IU(P)	89,7745
Tempos Totais Perdidos por Camião			161,518
Tempos Totais Perdidos por Pá			41,506
Produtividade	Camião		0,03715
Produtividade	Pá		0,14456

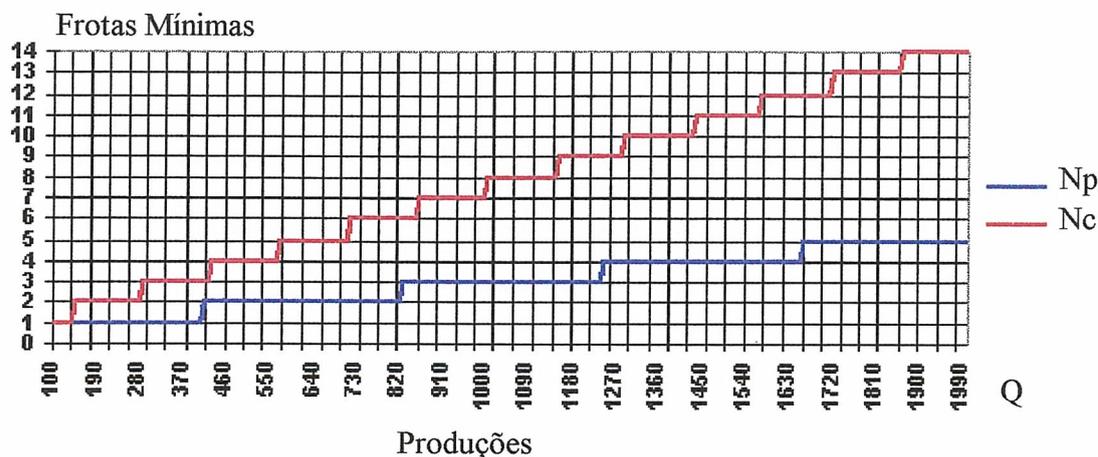
Na posse desta metodologia de cálculo, podemos agora variar a produção de um valor mínimo até um máximo, mediante um passo de evolução. Recorrendo a “macros” previamente implementadas, surge uma tabela como a que apresentamos de forma reduzida:

### Mapa de Resultados

Prod	Frota		Tempos de Ciclo Efectivo		Índices de Utilização		Tempos Perdidos		Produtividades		
	Q	NP	NC	TCE(P)	TCE(C)	IU(C)	IU(P)	AATC(C)	AATC(P)	PDV(C)	PDV(P)
125	1	1		1209,6	1209,6	87,31809689	30,12566138	153,4003	845,2	0,0391134	0,0070989
130	1	1		1163,076923	1163,076923	90,81082077	31,33068783	106,877223	798,676923	0,0561392	0,0075124
135	1	1		1120	1120	94,30354464	32,53571429	63,8003	755,6	0,0940434	0,0079407
140	1	1		1080	1080	97,79626852	33,74074074	23,8003	715,6	0,2520977	0,0083846
145	1	2		1042,758621	2085,517241	50,6444962	34,9457672	1029,31754	678,358621	0,0058291	0,0088449
150	1	2		1008	2016	52,39085813	36,15079365	959,8003	643,6	0,0062513	0,0093226
155	1	2		975,483871	1950,967742	54,13722007	37,35582011	894,768042	611,083871	0,0067056	0,0098186
160	1	2		945	1890	55,88358201	38,56084656	833,8003	580,6	0,007196	0,0103341
270	1	2		560	1120	94,30354464	65,07142857	63,8003	195,6	0,0940434	0,0306748
275	1	2		549,8181818	1099,636364	96,04990658	66,27645503	43,4366636	185,418182	0,1381322	0,0323593
280	1	2		540	1080	97,79626852	67,48148148	23,8003	175,6	0,2520977	0,0341686
285	1	2		530,5263158	1061,052632	99,54263046	68,68650794	4,85293158	166,126316	1,2363661	0,0361171
290	1	3		521,3793103	1564,137931	67,52599493	69,89153439	507,938231	156,97931	0,0118125	0,0382216

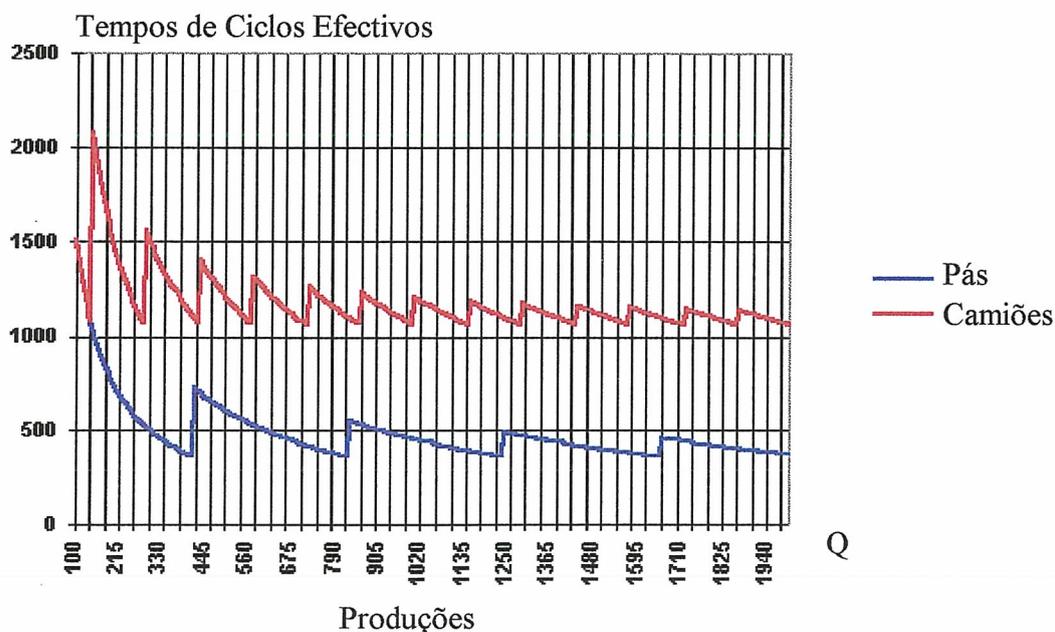
## Alguns gráficos com resultados

Não esquecendo que os resultados que agora passaremos a apresentar são relativos a uma situação particular, embora baseados em alguns dados oriundos de uma unidade industrial em laboração, poderemos retirar algumas ilações interessantes da análise dos mesmos.



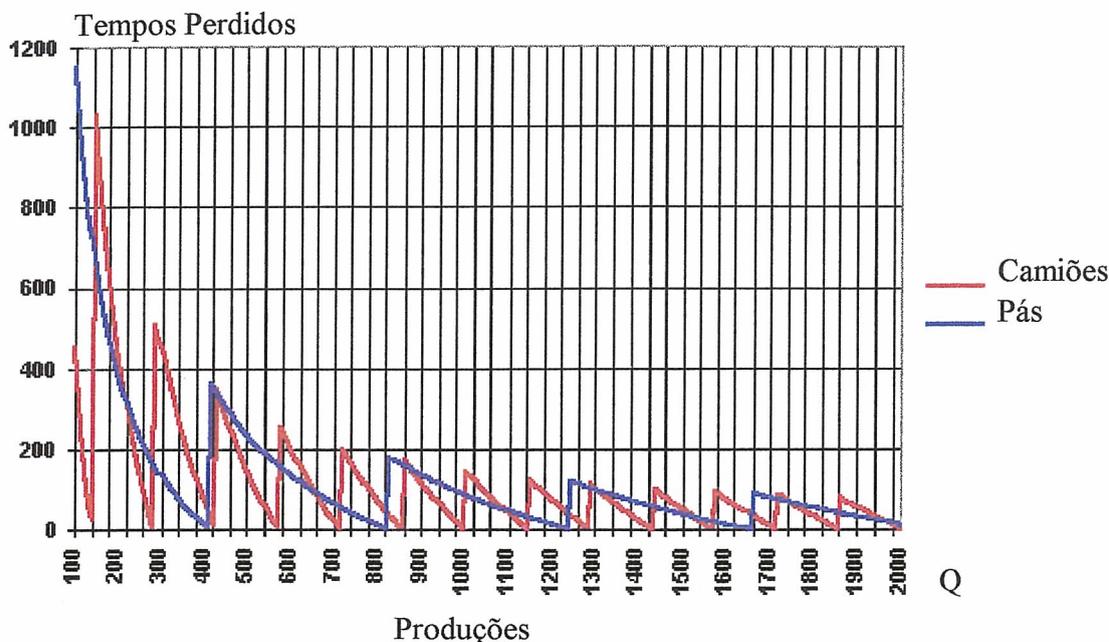
### Gráfico A

Uma mesma frota de camiões e de pás carregadoras é capaz de assegurar produções diversas. Com o aumento da produção, um mesmo número de pás carregadoras atende um número crescente de camiões.



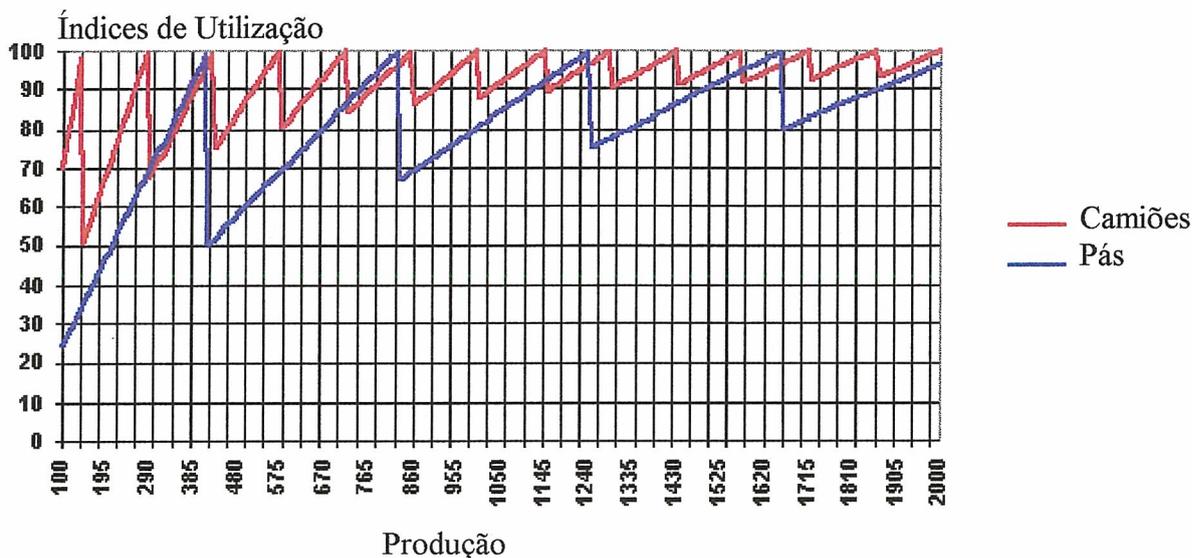
### Gráfico B

Observa-se uma tendência para a estabilização dos tempos de ciclos efectivos com o aumento da produção e consequente aumento das frotas necessárias.



**Gráfico C**

Em concordância com as ilações extraíveis do Gráfico B, os montantes dos tempos perdidos pelas frotas de pás carregadoras e camiões reduzem-se com o aumento da produção pretendida, tendendo para uma estabilização



**Gráfico D**

A prática coincidência de alguns dos picos das curvas de IU(P) e IU(C) como funções de Q denuncia situações de quase sincronismo, para frotas muito particulares e para gamas muito estreitas de produções.

### Validação do modelo recorrendo à comparação com resultados de uma simulação probabilística

Em paralelo com a construção e exploração do modelo que apresentámos, uma análise semelhante foi realizada sobre um outro modelo com estrutura probabilística. Este último simula o desempenho de um sistema caracterizado por:

- variabilidade dos tempos de actividade (tempos caracterizados por uma determinada média, uma dispersão em torno dessa média e com histogramas de frequências de ocorrência substituídos, com muito bom ou excelente ajustamento, por leis de probabilidade consagradas).

## Gráfico F

Definindo uma produtividade como o quociente entre a produção global conseguida por uma dada frota de pás e camiões e o somatório dos tempos perdidos durante o relevo pelas unidades que integram essa frota, é possível gerar um gráfico de produtividades versus pares  $(N_p, N_c)$  como o da figura. Observam-se picos de produtividade para um número restrito de pares  $(N_p, N_c)$ . Tais pares praticamente coincidem com os pares de valores  $(N_p, N_c)$  que estão associados as coincidências de picos já assinalados no Gráfico D.

Sendo a simulação probabilística uma “approach” muito mais perfeita à realidade que se pretende simular, a prática coincidência de resultados deste modelo e do modelo determinístico comprova que o algoritmo apresentado constitui uma ferramenta certamente mais rigorosa do que os esquemas clássicos de cálculo tradicionalmente invocados para dimensionamento de frotas de carga e transporte.

## Conclusões

A análise dos resultados da exploração do algoritmo permite inferir que:

- É falacioso pretender determinar o número mínimo de camiões a agregar a uma pá carregadora com base na fórmula tradicional  $N_c = TCM(C)/TC$ : mesmo em regime determinístico, os tempos de ciclo a considerar deverão ser sempre tempos de ciclo **efectivos** ( $TCE(C)$ ) e não tempos de ciclo mínimos ( $TCM(C)$ ).
- A condição de sincronismo que subjaz ao estabelecimento da sobredita fórmula somente seria satisfeita para situações altamente improváveis na prática, traduzidas pela verificação **exacta** da relação

$$\frac{N_c}{N_p} = \frac{TCM(C)}{TCM(P)}$$

- A relação fundamental a invocar na estruturação de esquemas de cálculo minimamente fiáveis para dimensionamento de frotas deve, portanto, ser

$$\frac{N_c}{N_p} = \frac{TCE(C)}{TCE(P)}$$

cuja traduz implicitamente a impossibilidade de se atingirem rendimentos  $RP = RC = 100\%$  (condição de sincronismo perfeito).

- Com uma dada frota de unidades carregadoras e de unidades transportadoras é possível a realização de uma gama mais ou menos extensa de produções, mas com rendimentos distintos da unidade e distintos entre si.
- Como corolário da asserção anterior, não faz sentido a interrogação (frequente na prática): com  $N_c$  camiões e  $N_p$  pás carregadoras de dadas características, que produção é possível realizar? É necessário completar a interrogação com a estipulação de rendimentos mínimos

( $R_c \leq x$ ,  $R_p \leq y$ ) para os equipamentos em causa porque, caso contrário a resposta resulta indeterminada.

- O gráfico (D) permite vislumbrar aproximações ao sincronismo denunciadas pela quase coincidência ou muito razoável vizinhança de picos das curvas em dente-de-serra aí figuradas.

Ocorrem, como se vê, para configurações  $N_c/N_p = 3/1, 6/2, 9/3, 12/4$  porque (no âmbito da análise **casuística** efectuada) se verifica ser

$$\frac{N_c}{N_p} \cong \frac{TCM(C)}{TCM(P)}$$

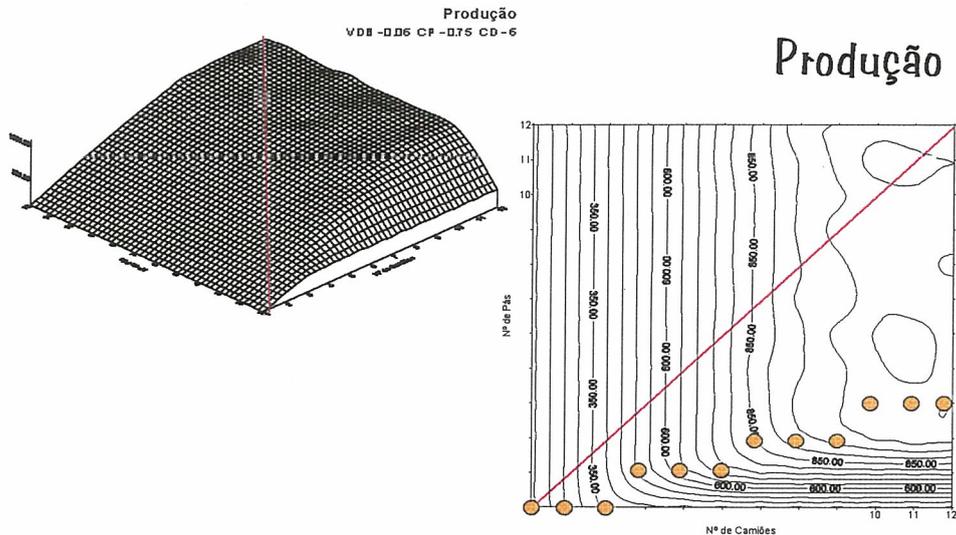
A proximidade dos picos significa que, **para dadas produções**, a igualdade

$$\frac{N_c}{N_p} = \frac{TCE(C)}{TCE(P)} = \frac{TCM(C)+AATC(C)}{TCM(P)+AATC(P)}$$

é verificada para valores muito baixos dos acréscimos de tempo dos ciclos  $AATC(C)$  e  $AATC(P)$ : é este facto que explica a circunstância de os índices de utilização de ambos os equipamentos se situarem simultaneamente muito próximos de 100%. Não obstante, a verificação simultânea de  $RC = RP = 100\%$  jamais ocorre.

- O algoritmo é susceptível de modificação com vista a
  - abarcar sistemas mais complexos, integrados ainda por um sub-sistema de descarga materializado por uma tolva com capacidade limitada, antecedendo um britador susceptível (como é obvio) de paragens esporádicas ao longo do relevo.
  - contemplar, à cabeça, restrições aos rendimentos dos equipamentos ( $RP \neq RC < 1$ ), assim se adequando a pesquisa das frotas mínimas necessárias às condições reais vigentes em dado período de vida de uma pedreira ou exploração mineira.

- existência de um sub-sistema de descarga caracterizado pela presença de uma tolva de capacidade limitada descarregando (com velocidade previamente estipulada) para um britador susceptível de paragens (por encravamento) aleatoriamente distribuídas ao longo do relevo.



### Gráfico E

Este gráfico, relativo a produções “versus” dimensão da frota ( $N_p$ ,  $N_c$ ), realça a existência de um patamar de produções resultante das repercussões do desempenho do sub-sistema de descarga sobre os sub-sistemas a montante (sub-sistema de carga e sub-sistema de transporte). O patamar significa que o aumento da dimensão das frotas não conduz a aumentos da produção expectável.

Invocando os resultados do modelo determinístico expressos no Gráfico A, nomeadamente a sequência de frotas mínimas determinadas e sobrepondo esses resultados no presente gráfico verifica-se uma coincidência entre estes valores e a linha que une os focos das curvas (pseudo-hipérboles) de isoprodução. Constatam-se que os resultados da simulação determinística aguentam muito bem o confronto com os resultados, **necessariamente mais fiáveis**, da simulação probabilística.

