

# INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL

Junho 1995

Número 1

Volume 15

Publicação Científica da



Associação Portuguesa para o Desenvolvimento  
da Investigação Operacional

# INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL

Propriedade:

APDIO — Associação Portuguesa para o Desenvolvimento  
da Investigação Operacional

## ESTATUTO EDITORIAL

*«Investigação Operacional», órgão oficial da APDIO cobre uma larga gama de assuntos reflectindo assim a grande diversidade de profissões e interesses dos sócios da Associação, bem como as muitas áreas de aplicação da I. O. O seu objectivo primordial é promover a aplicação do método e técnicas da I. O. aos problemas da Sociedade Portuguesa.*

*A publicação acolhe contribuições nos campos da metodologia, técnicas, e áreas de aplicação e software de I. O. sendo no entanto dada prioridade a bons casos de estudo de carácter eminentemente prático.*

---

**Distribuição gratuita aos sócios da APDIO**

# INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL

Volume 15 - nº 1 - Junho 1995

Publicação semestral

Editor Principal: Joaquim J. Júdice  
Universidade de Coimbra

## Comissão Editorial

M. Teresa Almeida  
Inst. Sup. Economia e Gestão

Jaime Barceló  
Univ. de Barcelona

Paulo Barcia  
Univ. Nova de Lisboa

Isabel Branco  
Univ. de Lisboa

António Câmara  
Univ. Nova de Lisboa

C. Bana e Costa  
Inst. Superior Técnico

M. Eugénia Captivo  
Univ. de Lisboa

Jorge O. Cerdeira  
Inst. Sup. de Agronomia

João Clímaco  
Univ. de Coimbra

J. Dias Coelho  
Univ. Nova de Lisboa

J. Rodrigues Dias  
Univ. de Évora

Laureano Escudero  
IBM, Espanha

J. Soeiro Ferreira  
Univ. do Porto

J. Fernando Gonçalves  
Univ. do Porto

Clóvis Gonzaga  
Univ. Fed., Rio Janeiro

Luís Gouveia  
Univ. de Lisboa

Rui C. Guimarães  
Univ. do Porto

J. Assis Lopes  
Inst. Superior Técnico

N. Maculan  
Univ. Fed., Rio Janeiro

Ernesto Q. Martins  
Univ. de Coimbra

Vladimiro Miranda  
Univ. do Porto

J. Pinto Paixão  
Univ. de Lisboa

M. Vaz Pato  
Inst. Sup. Economia e Gestão

Celso Ribeiro  
Univ. Católica, Rio Janeiro

A. Guimarães Rodrigues  
Univ. do Minho

Mário S. Rosa  
Univ. de Coimbra

J. Pinho de Sousa  
Univ. do Porto

Reinaldo Sousa  
Univ. Católica, Rio Janeiro

L. Valadares Tavares  
Inst. Superior Técnico

Isabel H. Themido  
Inst. Superior Técnico

B. Calafate Vasconcelos  
Univ. do Porto

José M. Viegas  
Inst. Superior Técnico

A Revista "INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL" está registada na Secretaria de Estado da Comunicação Social sob o nº 108335.

Esta Revista é distribuída gratuitamente aos sócios da APDIO. As informações sobre inscrições na Associação, assim como a correspondência para a Revista devem ser enviadas para a sede da APDIO - Associação Portuguesa para o Desenvolvimento da Investigação Operacional - CESUR, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1000 Lisboa.

Este Volume foi subsidiado por :

**Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica (JNICT)**

**Fundação Calouste Gulbenkian**

Para efeitos de dactilografia e composição, foram utilizados equipamentos gentilmente postos à disposição pelo CEAUL (DEIO - Faculdade de Ciências de Lisboa).

Assinatura: 5.000\$00

# MULTIPLE CRITERIA DECISION MAKING IN FORESTRY PLANNING: A CRITICAL REVIEW

**Carlos Romero**

Departamento de Economía y Gestión  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes  
Universidad Politécnica de Madrid  
Madrid, Spain

## Abstract

The Management of forestry resources is a clear multicriteria problem aimed at achieving objectives of a very different nature such as: economic, environmental, social, etc. The purpose of this paper is provide an overview of the main pros and cons of different multicriteria approaches when applied to the forestry field. From the analysis undertaken it is possible to deduce a certain superiority of the satisficing methods based on goals for forestry management problems and compromise programming for the appraisal of forestry assets.

## Keywords

Multicriteria analysis, forestry planning, goal programming, multiobjective programming.

## 1. Introduction

The management and planning of a forestry resource is a complex problem chiefly because of the multi-criteria character of the consequences inherent to the corresponding decision making processes. In fact, every decision taken in this field affects several criteria of very different nature such as: economic (timber, livestock, forage, etc.), environmental (wildlife protection, soil erosion control, etc.), social (level of employment, population settlement, etc.). Hence, for an optimum design of forestry management policies, the decision maker (DM) - private or public - has a preference structure involving several criteria. In other words, it is necessary to formulate forestry management models within the multiple criteria decision making (MCDM) paradigm.

Let us develop these ideas. Thus in the management of a public forestry area the interest of the whole society should be pursued. This social interest can be represented by a welfare functions including among their arguments all the services provided by the forestry area. Hence, if the vector of forestry strategies is represented by  $(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$  the following criteria functions should be considered:

$$\begin{aligned} \text{flow of economic services} &= f_1(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \\ \text{flow of environmental services} &= f_2(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \\ \text{flow of social services} &= f_3(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \end{aligned}$$

Therefore the structure of the social welfare function would be given by:

$$W = W[f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots]$$

Consequently, within this context the core of an operational model valid for the planning and management of the commented forestry area should be given by:

$$\begin{array}{ll} \text{Max} & W = W[f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots] \\ \text{subject to} & x \in F \end{array} \quad (1)$$

where the feasible domain  $F$  can be a continuous or a discrete set. This kind of approach is theoretically sound but presents many practical problems. An analysis of this kind of problems is presented in the next section. Applications of this approach in the forestry field are scarce, among these the following can be cited: Bell (1977), Bertier & Montgolfier and Teeter & Dyer (1986).

## 2. Limitations to the approach based on multiattribute utility functions

The multiattribute utility approach (MAUT) is usually applied to discrete contexts; i.e. the problem of choice from a finite set of alternatives or systems assessed according to several criteria. For instance, let us assume a case where five management regimes of a forestry system are evaluated according to three attributes: timber production, net present value and environmental impact. MAUT is a theoretically sound approach, but its applicability - at least in the forestry field - is full up of empirical as well as theoretical difficulties, as will be shown in this section.

A first step to apply MAUT to a real problem consists in accepting the existence of the individual utility functions for each attribute. For this, it is necessary to accept assumptions which are, in certain cases very controversial and quite difficult to corroborate empirically. Thus, it is necessary to accept - among other things - the continuity of preferences. This assumption works well in some contexts but may not be suitable in other situations, as is the case of the management of a forestry resource. For instance, let us assume a forestry planning problem where two attributes are considered: timber production and an index measuring the risk of biological collapse of the forest. It is obvious that in this context the acceptance of the continuity of preferences would imply the acceptance that there is always an increment in the volume of timber produced which compensates an increase in the risk of biological collapse of the forest, no matter how great the value of the index is. Obviously, this is not sensible. In other words in a forestry context preferences are not usually continuous (Romero, 1991b).

Once the existence of the individual utility functions has been accepted the next step consists in conjecturing a certain decomposition of the multiattribute utility function. To undertake this task, it is necessary to make assumptions about the independence or interdependence between attributes. Some of these assumptions are usually accepted as axiomatically true when they are actually questionable and sometimes are not supported by empirical evidence at least within a forestry context. This matter - which is crucial for the pragmatic appraisal of the MAUT approach - is illustrated with the assumption of preferential independence between attributes

which is essential to accept for most of the utility decomposition models used in practice, such as the additive or multiplicative form (Keeney & Raiffa, 1976).

The pair of attributes  $Z_1$  and  $Z_2$  is preferentially independent of attribute  $Z_3$  if and only if the trade-off between  $Z_1$  and  $Z_2$  is not affected by the level achieved by  $Z_3$  (e.g. Zeleny, 1982, pp.420-421). This condition is necessary (although not sufficient) to accept for instance the additive decomposition, which is very used in practice. However, this condition works well in some cases but in others it does not reflect the actual preferences of the  $\Gamma$ . Thus, to accept this condition implies to accept - among other things - the no interaction between preferences, which, in many decisional contexts, is not realistic.

In what follows this idea - which is crucial to appraise the applicability of MAUT in forestry planning - will be analyzed with the help of some examples (Rehman & Romero, 1993). Thus, in Table 1 it is sensible to assume that if  $A \geq B \Rightarrow C \geq D$ ; i.e., the attributes timber production and net present value are preferentially independent of the attribute number of visitors. That is, the trade-off between timber production and net present value is not affected by the number of visitors actually achieved. On the contrary, for the examples in Table 2 it is sensible to assume that if  $A \geq B$ , it does not necessarily imply that  $C \geq D$ . In fact, the DM can be interested in sacrificing 200Kg/ha of protein for an increase of 20m<sup>3</sup>/ha of timber production when the energy production is of 80000MJ/ha, however he may not be interested in accepting this trade-off when the level of energy is only 50000MJ/ha. In other words the attributes protein and timber production are not presumably preferentially independent of the attribute energy production.

Attributes Alternatives	Timber production -m <sup>3</sup> /ha-	Net present value -m.u./ha-	Number of visitors -visitors/ha-
A	70	4000	40
B	50	5000	40
C	70	4000	80
D	50	5000	80

Table 1 - A forestry planning example

Attributes Alternatives	Protein production -Kgr/ha-	Timber production -m <sup>3</sup> /ha-	Energy production -MJ/ha-
A	800	60	80000
B	1000	40	80000
C	800	60	50000
D	1000	40	50000

Table 2 - An agro-forestry planning example

Once a certain decomposition of the utility function is established - accepting rather arbitrary assumptions - then is necessary to elicit the individual utility functions for each

attribute as well as the weights and scaling factors involved in these functions. This task is not easy and requires an intensive interaction with the DM as well as the use of relatively sophisticated statistical procedures.

Some of the above problems associated with the MAUT approach can be mitigated resorting to alternative discrete approaches such as the ELECTRE methodologies based on outranking relationships (e.g. Roy, 1991) or the AHP approach (Analytic Hierarchy Process) which attempts to represent judgements in the form of paired comparisons (e.g. Saaty, 1980). Despite the clear operational character of these approaches, their exclusive orientation to discrete contexts make them of very limited interest in the forestry field, as the lack of applications reported in the literature show.

The argument developed up to now, lead us to a seemingly vicious circle. In fact, we accept the unquestionable necessity of considering multiple criteria in forestry planning but at the same time a sound theoretical structure based on utility functions to handle this multiplicity of criteria seems unworkable chiefly because of the continuous character of the feasible sets in this domain. The vicious circle actually exists but can be broken. To achieve this, surrogates of the MAUT approach have to be sought. That is, we must look for multi-criteria approaches without the theoretical soundness of MAUT but which are able to accommodate in a realistic way the multiplicity of criteria inherent to most forestry planning problems. In what follows the pros and cons of these possible surrogates will be analyzed.

### **3. Critical comments to the use of multiobjective approaches in forestry**

Multiobjective (MOP) approaches deal with simultaneous optimization of several objectives. As this kind of optimization is usually impossible - because of the usual degree of conflict between objectives - MOP seeks to find the set of efficient solutions in a paretian set (e.g. Cohon, 1978; Zeleny, 1982).

Most problems to the MOP approach, when applied to the forestry field, are of computational nature. In fact, it is an almost impossible task to determine the whole efficient set, except for small size problems which is not at all common in a forestry context. Thus, let us imagine a timber harvest scheduling problem with hundreds of decisional variables and restraints involving three or four objectives. This kind of problem - quite common in practice - is computationally intractable through MOP. In fact there are very few softwares capable of generating all the extreme efficient points of a MOP problem. The two most popular routines - both based on the multicriterion Simplex - are: ADBASE (Steuer, 1992) and MLP (Computing & Systems Consultant, 1987). ADBASE is capable of solving problems with moderate size matrices (i.e. no larger than  $50 \times 50$ ) and around 3 objectives. MPL presents computational difficulties with even smaller problems. Consequently, there is little interest of these routines in the forestry field.

For the above reasons, the only possible way to apply the MOP approach to real forestry cases consists in resorting to generating techniques able to approximate the efficient set such as



the weighting or the constraint technique. However, even for this kind of approximation methods the computational burden is important. Thus, the weighting technique requires solving  $P^{n-1}$  linear programming problems,  $P$  being the number of weights assayed and  $n$  the number of objectives. The constraint technique requires solving  $R^{n-1}$  linear programming problems,  $n$  being again the number of objectives and  $R$  the number of sub-intervals over which the range of objectives treated as restraints have been divided. This heavy computational burden considerably restricts the applicability of the MOP approach in forestry planning.

On the other hand MOP generates abundant and important information. Thus, the efficient set can be interpreted as the transformation curve or production possibility frontier for the objectives considered. From this frontier, it is possible to obtain the trade-offs between objectives; i.e., it is possible to measure the opportunity cost of one objective in terms of another. Thus, in a forestry context the determination of the efficient set allows us to measure the opportunity cost of timber production in terms of recreational activities.

When the number of objectives is limited to a maximum of two or three, it is then possible to give a graphical representation of the efficient set, thus increasing the relevance of its economic interpretation. In a problem with two objectives, the efficient set is determined by the straight lines connecting the extreme efficient points. Consequently, the slopes of these lines measure the opportunity cost of one objective in terms of the other. This advantage of the MOP approach vanishes for problems with more than three objectives.

In the forestry field it is very common to find decisional problems with five and more objectives, so the above advantage of the MOP approach disappears. However, the graphical interpretation of the efficient set can be exploited in forestry planning through partial analysis (*ceteris paribus*). With this kind of analysis the transformation curve between two objectives keeping the value of the other objectives fixed can be obtained.

An additional difficulty associated with the application of this approach to problems with a moderate size lies in the huge amount of information generated by the model. Thus, in a MOP problem with a matrix around  $50 \times 50$  and with a number of objectives around four several hundreds of extreme efficient points can be generated. It is obvious that this kind of situation is very common in the forestry field. This aspect of MOP implies another weakness of the approach since its application means to inundate the DM with an amount of information very difficult to digest.

From the above ideas it is deduced although the MOP approach is a powerful instrument, the important number of objectives added to the complexity of the constraint set in forestry applications restrict the interest of this approach. It can be said that its use is limited to small size problems or when partial analysis is undertaken in order to establish trade-off curves between two objectives keeping the values of the other fixed.

Some interesting applications of the MOP approach in forestry are mentioned below. Within the forest management problem at least the following papers can be cited: Allen (1986), De

Kluyver et al. (1980), Hallefjord et al. (1986) and Steuer & Schuler (1978). The timber harvest scheduling problem has been analyzed with a MOP approach by Riitters et al. (1982). Finally Bare & Mendoza (1988) interactively introduce the preferences of DM in a decisional problem with two objectives: to maximize timber productions and to maximize the number of beneficial animals that can be sustained by the forest.

#### **4. The satisficing approach: pros and cons**

Goal Programming (GP) was introduced by Charnes, Cooper & Ferguson (1955) and Charnes & Cooper (1961). GP is considered nowadays the operational dimension of the "satisficing philosophy" proposed by Simon (1955, 1957, 1979). Within this decisional paradigm the DM does not try to maximize anything, much less a well defined utility function but tries to satisfy as much as possible a set of goals which are relevant for the problem being analysed. There are different GP variants, the two most widely used are weighted goal programming (WGP) and lexicographic goal programming (LGP). Technical explanations of GP be found in the books by Lee (1972) and Ignizio (1976).

The main advantage of GP lies in the ease with which solutions can be computed. This is true even for large size models, thus increasing the interest of this approach in the forestry field. To solve a WGP model it is enough to resort to the Simplex algorithm. For the LGP models, given the vectorial structure of the objective function they cannot be solved by a straightforward application of the Simplex. There are, however, methods based on the Simplex such as the "sequential method" (Ignizio & Perlis, 1979) - which is basically an iterative Simplex - or the "multiphase Simplex" (Lee, 1972) or the "partitioning algorithm" which are capable of solving LGP problems of large size in a single computer run.

A possible weakness of GP when it is applied to forestry problems lies in the huge amount of information requested from the DM in order to build the model. In fact, to implement a GP model, the DM has to provide information related to: target values, weights attached to each goal placed within a certain priority, pre-emptive ordering of preferences, etc. It is obvious that the increasing complexity of forestry systems make it very difficult to the DM to provide all this information.

This apparent weakness of GP can be mitigated by resorting to a sensitivity analysis. In this way, it is possible to test several values for those parameters with a higher level of uncertainty. Another way to mitigate this problem consists on resorting to an interactive approach in order to elicit the values of parameters, such as targets, weights, etc., by an interaction between the model and the DM through the analyst. Spronk (1980) is a good reference of a methodology which allows to obtain interactively the values of the parameters of a GP model.

Another possible weakness of this approach lies on the meagre information provided by a GP model. In fact a WGP or a LGP model provides a single solution; i.e. the solution nearest with respect to the vector of target values. However, this difficulty is more apparent than real.

Thus, by resorting again to a sensitivity analysis the GP model can generate abundant and useful information to the DM.

Therefore, within the forestry field, GP seems to be a robust approach capable of generating useful information for the corresponding public or private decision makers. In other words, the multi-criteria methods based on goals are - at least in the forestry field - good surrogates of the theoretical structure based on multiattribute utility function (see expression (1)). However, it should be indicated that a mechanistic use of GP can lead and actually has led to misleading or even to erroneous results. These kind of shortcomings are not inherent to the logic underlying GP but are actually caused by an unsatisfactory use of the approach. A thorough analysis of this kind of problems as well as techniques to avoid them can be seen in Romero (1991a).

The robustness of GP in the management of forestry resources is corroborated by an extensive applied literature. Thus, within the forest management problem the following papers can be cited: Arp & Lavigne (1982), Bottoms & Bartlett (1975), Chang & Buongiorno (1981), Field (1973), Kahalas & Groves (1978), Schuler & Meadows (1975) and Schuler et al. (1977). The timber harvest scheduling problem has been analyzed with the help of GP models in papers such as: Field et al. (1980), Hotvedt (1983), Hotvedt et al. (1982) and Kao & Brodie (1979). Another GP applications in Forestry include Walker (1985), where a LGP model is applied to an afforestation problem, Porterfield (1976) which uses LGP to study tree improvement problems, and Mitchell & Bare (1981) which apply WGP to stratified random sampling in forest inventory design.

##### 5. Compromise programming and the appraisal of forestry assets

The first step in compromise programming (CP) is to establish what Yu (1973) and Zeleny (1973) call the ideal point. The co-ordinates for the ideal point are given by the optimum values of the different objectives subject to the constraints of the problem. When the ideal point is infeasible - which is usual in practice - the optimum element or best - compromise solution is given by the efficient solution that is closest to the ideal point. Depending upon the metric used different compromise solutions will be obtained. Yu (1973) demonstrated that for bi-criteria problems, the metrics  $\pi = 1$  and  $\pi = \infty$  define a subset of the efficient set which Zeleny (1974) called the compromise set. The other best - compromise solutions fall between those corresponding to the metrics  $\pi = 1$  and  $\pi = \infty$ . Freimer & Yu (1976) demonstrated that this property is not rigorously valid for problems with more than two objectives.

The interest and applicability of CP in the forestry field is relevant only when the number of objectives is limited to two, which is not a common situation. For problems with more than two objectives CP does not present real advantages with respect to the GP approaches presented in the preceding section. However, CP for the bi-criteria cases hybridized with some recent results which connect the compromise sets with the utility optima can become a powerful tool for the appraisal of a multiple use forest. In what follows this problem will be approximated. With this

purpose, let us represent by  $x_1$  the timber production and by  $x_2$  the recreational yields generated by a forestry space. From technological information, the transformation curve  $T(x_1, x_2) = K$  which represents the feasible domain of mixes can be obtained. The ideal values  $x_1^*$  and  $x_2^*$  correspond to the intersections of the transformation curve with the co-ordinate axes (i.e.  $x_1^* = T(x_1, 0)$ ,  $x_2^* = T(0, x_2)$ ).

To appraise the forestry space we need to obtain the optimal timber-recreation product mix. The first step for this task will consist in obtaining the weights or relative importance to be attached to each output. In our context the market prices of both outputs are not related to the production scenario even the second output has no market price hence it seems sensible to conceptualize the weights as shadow prices. Thus as already been proved elsewhere (Ballestero & Romero, 1993)

$$W_1 x_1^* = W_2 x_2^* = R \quad (2)$$

where  $W_1$  and  $W_2$  are the weights to be attached to the two outputs (timber and recreational activities) and  $R$  is the cost of the resources necessary to obtain a certain mix on the transformation curve. To clarify the meaning of condition (2), let us represented by  $\bar{R}$  the aggregate shadow value of both products (i.e.  $\bar{R} = W_1 x_1 + W_2 x_2$ ). It seems sensible that in our scenario a consistent "perfect" system of shadow prices should hold the following two conditions:

- 1<sup>a</sup>) The shadow value  $\bar{R}$  of mix  $(x_1, x_2)$  must be greater than or equal to the corresponding aggregate cost  $R$ , that is:

$$\bar{R} = W_1 x_1 + W_2 x_2 \geq R \quad (3)$$

- 2<sup>a</sup>) The difference  $(\bar{R} - R)$  between the shadow value of the mix  $\bar{R}$  and the cost of resources has to be as small as possible, that is

$$\text{Min } (\bar{R} - R) \quad (4)$$

Ballestero & Romero (1993) have proven that the only set of weights  $(W_1, W_2)$  which minimize (4) subject to restraint (3) is given by (2). Therefore, the following weights are adopted:

$$W_1 = \frac{R}{x_1^*}, \quad W_2 = \frac{R}{x_2^*} \quad (5)$$

For these weights and by applying the usual CP techniques (see e.g. Zeleny 1982 for technical details), the  $L_1$  bound of the compromise set is obtained by solving the following optimization problem:

$$\text{Min } R(x_1^* - x_1)/x_1^* + R(x_2^* - x_2)/x_2^* \quad (6)$$

subject to:  $T(x_1, x_2) = K$

Model (6) is tantamount to the following simpler structure:

$$\text{Min } x_1/x_1^* + x_2/x_2^* \quad (7)$$

subject to:  $T(x_1, x_2) = K$

For the weights given by (5) the  $L_\infty$  bound of the compromise set can be obtained by solving the following system of two equations:

$$x_1/x_1^* - x_2/x_2^* = 0 \tag{8}$$

$$T(x_1, x_2) = K$$

It has been proved elsewhere (Ballestero & Romero, 1991) that when the marginal rates of substitution between the two attributes (timber and recreational products in our case) behave coherently with the deminishing marginal rate of substitution law, the utility optimum lies within the bounds of the compromise set. That is, the optimal timber-recreation product mix imply a timber production comprised between  $x_{11}$  and  $x_{1\infty}$  tons and a recreational yield comprised between  $x_{21}$  and  $x_{2\infty}$  visitors (see figure 1). These figures surrogate the value of the two purposes or outputs provided by the forestry area.

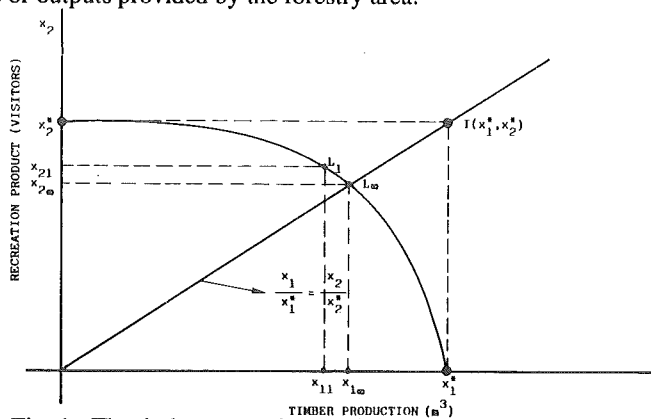


Fig. 1 - The timber-recreation product MIX: optimum compromise

To illustrate the logic as well as the operational articulation of the above ideas we will resort to a simple example. Let us assume the following transformation curve between timber production  $x_1$  and recreational activities  $x_2$ :

$$x_1^2 + 9x_2^2 = 36000000 \tag{9}$$

From (9) the following ideal values for each use of the forestry area are obtained:

$$x_1^* = 6000m^3 \quad x_2^* = 2000 \text{ visitors}$$

Let us assume that the cost level R is 12 millions of pesetas. Therefore, according to (2) or (5) the shadow prices to be attached to timber production and recreational activities are equal to:

$$W_1 = \frac{12000000}{6000} = 2000 \text{ ptas/m}^3 \quad ; \quad W_2 = \frac{12000000}{2000} = 6000 \text{ ptas/visitor}$$

From these values the following normalized weights can be adapted:  $W'_1 = 0.25$  and  $W'_2 = 0.75$ . From these values the  $L_1$  bound of the compromise is obtained according to (6) or (7) by solving the following optimization problem:

$$\text{Max} \quad 0.25x_1 + 0.75x_2 \tag{10}$$

$$\text{subject to:} \quad x_1^2 + 9x_2^2 = 36000000$$

Solution of (10) is given by:

$$x_1 = 4243\text{m}^3; \quad x_2 = 1414 \text{ visitors}$$

The  $L_\infty$  bound of the compromise set is obtained by solving the following systems of two equations:

$$x_1 - 3x_2 = 0 \quad (11)$$

$$x_1^2 + 9x_2^2 = 36000000$$

Solution of (11) coincides with the above solution; that is, in this example, both bounds  $L_1$  and  $L_\infty$  coincide, hence the compromise set is reduced to a single point. Therefore the application of the proposed methodology gives a value of the forestry area of  $4243\text{m}^3$  of timber and 1414 visitors. This result leads to the following moneatry indicator as shadow aggregated value  $\bar{R}$  of the whole flow of services of the forestry area:

$$\bar{R} = 200 \times 4243 + 6000 \times 1414 = 16970000 \text{ ptas}$$

## References

- [1] Allen, J.C. (1986), Multiobjective regional forest planning using the noninferior set estimation (NISE) method in Tanzania and the United States, *Forest Science* 32, 517-533.
- [2] Arp, P.A and Lavigne, D.R. (1982), Planning with goal programming: a case study for multiple-use of forested land, *Forestry Chronical* 58, 225-232.
- [3] Arthur, J.L. and Ravindran, A. (1978), An efficient goal programming algorithm using constraint partitioning and variable elimination, *Management Science* 24, 867-868.
- [4] Arthur, J.L., Ravindran, A. and Papp, A. (1980), Partitioning algorithm for (linear) goal programming problems, *ACM Transactions Mathematical Software* 6, 378-386.
- [5] Ballesteros, E. and Romero C. (1991), A theorem connecting utility function optimization and compromise programming, *Operations Research Letters* 10, 421-427.
- [6] Ballesteros, E. and Romero, C. (1993), Weighting in compromise programming: a theorem on shadow prices, *Operations Research Letters* 13, 325-329.
- [7] Bare, B. and Mendoza, G. (1988), Multiple objective forest land management planning: an illustration, *European Journal of Operational Research* 34, 44-55.
- [8] Bell, D.E., A decision analysis of objectives for a forest pest problem, in: *Conflicting Objectives in Decisions*, Bell, D.E., Keeney, R.L. and Raiffa, H. (eds.), John Wiley & Sons, Chichester, chapter 18.
- [9] Bertier, P. and Montgolfier, J. (1974), On multicriteria analysis: an application to a forest management problem, *Metra* 13, 33-45.
- [10] Bottoms, K.E. and Bartlett, E.T. (1975), Resource allocation through goal programming, *Journal Range Management* 28, 442-447.
- [11] Chang, S.J. and Buongiorno, J. (1981), A programming model for multiple use forestry, *Journal of Environmental Management* 23, 41-54.
- [12] Charnes, A. and Cooper, W.W. (1961), *Management models and industrial applications of linear programming*, John Wiley & Sons, New York.
- [13] Charnes, A., Cooper W.W. and Ferguson, E. (1955), Optimal estimation of executive compensation by linear programming, *Management Science* 1, 138-151.
- [14] Cohon, J.L. (1978), *Multiobjective programming and planning*, Academic Press, New York.
- [15] De Kluyver, C.A., Daellenbach, H.G. and Whyte, A.G.D. (1980), A two-stage, multiple objective mathematical programming approach to optimal thinning and harvesting, *Forest Science* 26, 674-686.
- [16] Dyer, A.A., Hof, J.G., Kelli, J.W., Crim, S.A. and Alward, G.S. (1979), Implications of goal programming in forest resource allocation, *Forest Science* 25, 535-543.
- [17] Dyer, A.A., Jof, J.G., Kelly, J.W., Alward, G.S. and Crim, S.A. (1983), Implications of goal programming in forest resource allocation: a reply, *Forest Science* 29, 837-840.
- [18] Field, D.B. (1973), Goal programming for forest management, *Forest Science* 19, 125-135.
- [19] Firded, R.C., Dress, P.E. and Fortson, J.C. (1980), Complementary linear and goal programming procedures for timber harvest scheduling, *Forest Science* 26, 121-133.
- [20] Freimer, M. and Yu, P.L. (1976), Some new results on compromise solutions for group decision problems, *Management Science* 22, 688-693.

- [21] Hallefjord, A., Jörnsten, K. and Eriksson, O. (1986), A long range forestry planning problem with multiple objectives, *European Journal of Operational Research* 26, 123-133.
- [22] Hotvedt, J.E. (1983), Application of linear goal programming to forest harvest scheduling, *Southern Journal of Agricultural Economics* 15, 103-108.
- [23] Hotvedt, J.E., Leuschner, W.A. and Buhyoff, G.J. (1982), A heuristic weight determination procedure for goal programs used for harvest scheduling models, *Canadian Journal of Forestry* 12, 292-298.
- [24] Ignizio, J.P. (1976), *Goal programming and extensions*, Lexington Books, Massachusetts.
- [25] Ignizio, J.P. and Perlis, J.H. (1979), Sequential linear goal programming: implementation via MPSX, *Computers & Operations Research* 6, 141-145.
- [26] Kahalas, H. and Groves, D.L. (1978), Modeling for organizational decision-making: profit vs. social values in resource management, *Journal of Environmental Management* 6, 73-84.
- [27] Kao, C. and Brodié, J.D. (1979), Goal programming for reconciling economic, even flow and regulation objectives in forest harvest scheduling, *Canadian Journal of Forest Research* 9, 525-531.
- [28] Keeney, R.L. and Raiffa, H. (1976), *Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs*, John Wiley & Sons, New York.
- [29] Lee, S.M. (1972), *Goal programming for decision analysis*, Auerbach Publishers, Philadelphia.
- [30] Mitchell, B.R. and Bare, B.B. (1981), A separable goal programming approach to optimizing multivariate sampling designs for forest inventory, *Forest Science* 27, 147-162.
- [31] Porterfield, R.L. (1976), A goal programming model to guide and evaluate tree improvement programs, *Forest Science* 22, 417-430.
- [32] Rehman, T. and Romero, C. (1993), The application of the MCDM paradigm to the management of agricultural systems: some basic considerations, *Agricultural Systems* 41, 239-255.
- [33] Riitters, K., Brodie, J.D. and Kao, C. (1982), Volume versus value maximization illustrated for Douglas-Fir with thinning, *Journal of Forestry* 80, 86-89 and 107.
- [34] Romero, C. (1991a), *Handbook of critical issues in goal programming*, Pergamon Press, Oxford.
- [35] Romero, C. (1991b), On misconceptions in goal programming, *Journal of the Operational Research Society* 42, 927-928.
- [36] Roy, B., The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods, *Theory and Decision* 31, 49-73.
- [37] Saaty, T.L. (1980), *The analytic hierarchy process*, McGraw Hill, New York.
- [38] Schuler, A. and Meadows, J.C. (1975), Planning resource use on national forests to achieve multiple objectives, *Journal of Environmental Management* 3, 351-366.
- [39] Schuler, A.T., Webster, H.H. and Meadows, J.C. (1977), Goal programming in forest management, *Journal of Forestry* 75, 320-324.
- [40] Simon, H.A. (1955), A behavioral model of rational choice, *Quarterly Journal of Economics* 69, 99-118.
- [41] Simon, H.A. (1957), *Models of man*, John Wiley & Sons, New York.
- [42] Simon, H.A. (1979), Rational decision making in business organizations, *American Economic Review* 69, 493-513.
- [43] Spronk, J. (1981), *Interactive multiple goal programming*, Martinus Nijhoff Publishing, Boston.
- [44] Steuer, R.E. (1992), *Manual for the ADBASE multiple objective linear programming package*, College of Business Administration, The University of Georgia.
- [45] Steuer, R.E. and Schuler, A.T. (1978), An interactive multiple objective linear programming approach to a problem in forest management, *Operations Research* 26, 254-269.
- [46] Teeter, L.D. and Dyer, A.A. (1986), A multiattribute utility model for incorporating risk in fire management planning, *Forest Science* 32, 1032-1048.
- [47] Walker, H.D. (1985), An alternative approach to goal programming, *Canadian Journal of Forest Research* 15, 319-325.
- [48] Yu, P.L. (1973), A class of solutions for group decision problems, *Management Science* 19, 936-946.
- [49] Zeleny, M. (1973), Compromise programming, in: *Multiple Criteria Decision Making*, Cochrane, J.L. and Zeleny, M. (eds.), Columbia, University of South Carolina Press, 262-301.
- [50] Zeleny, M. (1974), Compromise programming and the method of the displaced ideal, *Computers & Operations Research* 1, 479-496.
- [51] Zeleny, M. (1982), *Multiple criteria decision making*, McGraw-Hill, New York.





## UMA NOVA ABORDAGEM AO PROBLEMA DA CONSTRUÇÃO DE UMA FUNÇÃO DE VALOR CARDINAL: MACBETH

Carlos A. Bana e Costa  
Instituto Superior Técnico,  
Dep. Eng. Civil/CESUR  
Av. Rovisco Pais, 1000 Lisboa

Jean-Claude Vansnick  
Université de Mons-Hainaut  
F.S.E.S., Place du parc, 20  
7000 Mons, Bélgica

### Abstract

Classical techniques for cardinal measurement of values, such as direct rating and bisection, are often criticised in decision and psychology literature, because they require from the evaluators the comparison of two pairs of stimuli or alternatives. To bypass this problem, we conceived *MACBETH* (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*), a new approach for the quantification of value judgements, in which the evaluator is asked to give an absolute judgement of difference of attractiveness between two actions. To ease the elaboration of such judgements, a semantic scale of six categories of difference of attractiveness is presented to the evaluator. The numerical scale proposed by *MACBETH* is obtained by linear programming, so as an indicator of inconsistency of the set of judgements and suggestions to address eventual inconsistency situations. The theoretical problem behind the conception of *MACBETH* is the one of the numerical representation of multiple semi-orders by constant thresholds. *MACBETH* is a constructive and interactive approach for decision aid, as illustrated with a real application in public decision making.

### Resumo

As principais técnicas de construção de uma função de valor cardinal, como as técnicas de *direct rating* e da "bisseção", são muitas vezes criticadas na literatura da decisão e da psicologia por se basearem em processos de diálogo analista / avaliador que requerem deste último a elaboração de juízos de valor relativo entre dois pares de estímulos ou acções potenciais. Para ultrapassar as dificuldades inerentes a este tipo de questões, propõe-se neste artigo uma chave original de entrada na modelação cardinal das preferências, *MACBETH* (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*), que requer do avaliador a elaboração de juízos absolutos de diferença de atractividade entre duas acções. Para facilitar a elaboração destes juízos, recorre-se à utilização de uma escala de categorias semânticas de diferença de atractividade, propostas *a priori* ao avaliador pelo analista. A função-critério construída é obtida por programação linear. O método fornece um indicador de inconsistência do conjunto de juízos formulados e sugestões facilitando a sua eventual revisão. Mostra-se que o problema teórico subjacente é o da representação numérica de semi-ordens múltiplas por limiares constantes e apresentam-se as hipóteses de trabalho subjacentes, as quais não são nem de natureza normativa, nem prescriptiva. *MACBETH* insere-se numa abordagem construtivista de apoio à decisão e a interactividade é uma das suas vantagens fundamentais. Por fim, apresentam-se exemplos de aplicação extraídos de um caso real recente de apoio multicritério à tomada de decisão.

### Keywords

Cardinal value functions, decision aid, interactiveness.

"The ideas which are here expressed so laboriously are extremely simple and should be obvious. The difficulty lies, not in the new ideas, but in escaping from the old ones, which ramify, for those brought up as most of us have been, into every corner of our minds."

John M. Keynes

## 1. Introdução

Acompanhando a emergência de um novo *paradigma da aprendizagem* em Investigação Operacional e Análise de Sistemas (cf. [Tomlinson e Kiss, 1984], [Rosenhead, 1989], [Bana e Costa, 1993]), a actividade de *estruturação* tem vindo a merecer uma atenção crescente na literatura da decisão. A estruturação de um problema de decisão pode ser um fim, em si mesma, que permita estabelecer uma linguagem de debate e aprendizagem no processo de decisão, descrevendo os *impactos* plausíveis segundo os diversos *pontos de vista* que explicitam os sistemas de valores dos actores intervenientes no processo. Além disso, uma família  $F$  de *n* *pontos de vista fundamentais*,  $F = \{PV_1, \dots, PV_j, \dots, PV_n\}$ , cuja construção é o ponto culminante da *fase de estruturação* num estudo de apoio à decisão, pode, também, servir como base (ponto de partida) para a elaboração de juízos de valor, absoluto ou relativo, sobre acções potenciais (recorde-se que uma *acção potencial* é uma acção real ou fictícia provisoriamente julgada realista [Roy, 1985]). Esta nova fase, *de apoio à avaliação*, passará, se se optar por uma metodologia multicritério (cf. [Bana e Costa, 1990]):

- pela construção para cada ponto de vista fundamental  $PV_j$  de um *modelo de preferências locais (critério)* sobre um conjunto  $A$  de acções potenciais, e
- pela *agregação* dos juízos de valor locais, assim construídos, num *modelo de avaliação global*, tendo em conta certas informações de natureza inter-pontos de vista.

À partida para o desenvolvimento deste artigo, situamo-nos na zona de transição entre as fases de estruturação e de avaliação de um processo de apoio à decisão (ver figura 1) e assumimos que da estruturação são conhecidos os *impactos*  $i_j(a)$  de cada acção  $a$  de  $A$ , eventualmente acompanhados de informações complementares  $\delta_j(a)$  sobre a verosimilhança e ou precisão do(s) nível(is) de impacto que constituem  $i_j(a)$ ,  $j = 1, \dots, n$ . Assumimos, também, a hipótese de independência preferencial, isto é, que a família  $F$  foi construída de tal modo que raciocínios, sobre um ponto de vista fundamental, do tipo "todas as outras coisas iguais" são aceitáveis como hipóteses de trabalho, no quadro de uma abordagem construtiva ao problema da elaboração de um modelo de preferências locais e, depois, globais.

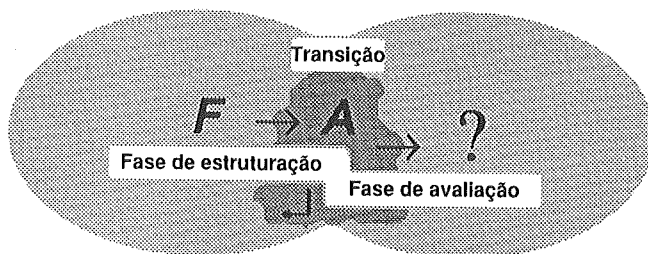


Figura 1 - As duas grandes fases de um estudo de apoio à decisão

Qualquer discussão sobre o tipo de metodologia a seguir na construção de um modelo de preferências globais sobre  $A$  é indissociável do tipo de modelo de preferências locais que se vai associar a cada ponto de vista fundamental  $PV_j$  da família  $F$  - isto é, do tipo de *modelo de juízos de valor* sobre as acções de  $A$ , ou *modelo-critério*. A questão de fundo que se põe à partida para a avaliação local é: *Dados os impactos  $i_j(a)$  e  $i_j(b)$  de duas acções quaisquer de  $A$  sobre um ponto de vista  $PV_j$ , eventualmente acompanhados de indicadores de dispersão  $\delta_j(a)$  e  $\delta_j(b)$ , que "chaves" utilizar para apoiar os actores na avaliação local das acções, em termos relativos ou absolutos, raciocinando todas as outras coisas iguais?* Segundo o tipo de resposta a esta questão, um *critério* ou modelo de juízos de valor associado a um ponto de vista pode revestir múltiplas facetas: um *sistema relacional de preferências* sobre  $A$  (cf. [Roy, 1985, capítulo 7], [Roy e Vincke, 1984]), uma *partição* de  $A$  em categorias, por exemplo, com base num processo de votação (cf. [Brams e Fishburn, 1983]), uma *escala numérica sobre  $A$  quantificando a ideia de valor ou de utilidade* de cada elemento de  $A$  segundo o ponto de vista subjacente (como nas Teorias do Valor ou da Utilidade, cf. [von Winterfeldt e Edwards, 1986], [Keeney e Raiffa, 1976]), uma *escala numérica sobre  $A \times A$  quantificando a ideia de credibilidade* de uma afirmação sobre a preferência relativa entre duas acções de  $A$ , como na Abordagem da Subordinação (*Surclassement*, cf. [Roy, 1985 e 1990]), etc.

Ao escolher-se o tipo de modelo de preferências a associar a cada ponto de vista fundamental, é importante reflectir sobre os problemas de *significação* que se podem pôr, seja em termos de *compreensão* do modelo pelos actores (*significação substantiva*), seja em termos de *significação quantitativa* de condições sobre as diferenças de valor entre duas quaisquer acções<sup>1</sup>. Para evitar, aquando da *agregação*, problemas de falta de *significação quantitativa*, é sabido que convém construir *escalas numéricas cardinais*, para o que têm sido propostos diversos métodos que se diferenciam pelo tipo de *propriedade* das acções que se quer *medir* e, também, pelo tipo de correspondência que estabelecem entre o conjunto  $\mathfrak{R}$  dos números reais e as características em  $A$  da propriedade a medir, isto é, pelo tipo de *chaves* utilizadas para construir tais escalas.<sup>2</sup>

- 
- 1 Por *significação quantitativa* designamos a noção de *meaningfulness* da Teoria da Mensuração (*Measurement Theory*, cf. [Roberts, 1979]). A distinção entre os dois tipos de *significação*, *substantiva* e *quantitativa*, é clara em [French, 1988, pp. 328–329].
  - 2 Recorde-se que, por definição, uma *escala numérica* sobre um conjunto  $X$  é uma função  $v$  de  $X$  em  $\mathfrak{R}$  que faz corresponder a cada elemento  $x$  de  $X$  um número real  $v(x)$ , sendo a distinção de base entre *escalas ordinais* e *escalas cardinais* (cf. [Torgerson, 1958, pp. 14–16]). As *escalas de intervalos* (transformações admissíveis do tipo *lineares positivas*:  $v'(x) = \alpha \cdot v(x) + \beta$ ,  $\alpha > 0$ ) e as *escalas de razões* ou *racios* ("transformações similares":  $v'(x) = \alpha \cdot v(x)$ ,  $\alpha > 0$ ) (cf. [Stevens, 1946]) são *escalas cardinais*, tal como o são as *escalas absolutas* (cf. [Roberts, 1979, p. 64]) (transformação admissível, a *identidade*:  $v'(x) = v(x)$ , a escala é *única*). Já para uma *escala ordinal* é admissível qualquer transformação *monótona estritamente crescente*.

## 2. A noção de diferença de atractividade como base para a construção de critérios de valor cardinais

Neste artigo interessam-nos unicamente os métodos concebidos para ajudar a construir uma *escala de intervalos* sobre  $A$  quantificando a ideia de *valor* (propriedade de *atractividade*) das acções de  $A$  segundo um dado ponto de vista fundamental  $PV_j$ .

O mesmo é dizer que se procura construir uma função-critério  $v(\cdot): A \rightarrow \mathfrak{R}: a \rightarrow v(a)^3$  tal que, não só o número real  $v(a)$  represente numericamente (seja uma *medida* de) o *valor* de qualquer acção  $a \in A$ , em termos de  $PV_j$ , no sentido (substantivo) em que:

$$\forall a, b \in A, v(a) > v(b) \text{ se e só se para o avaliador } a \text{ é mais atractiva (localmente) que } b \text{ (} a P b \text{),}$$

mas também qualquer diferença positiva  $v(a) - v(b)$  represente numericamente a *diferença de valor* entre  $a$  e  $b$ , com  $a P b$  sempre em termos de  $PV_j$ , no sentido (substantivo) em que:

**Condição I:**  $\forall a, b, c, d \in A$  com  $a$  mais atractiva que  $b$  e  $c$  mais atractiva que  $d$ , para o avaliador, o quociente  $[v(a) - v(b)]/[v(c) - v(d)]$  reflecte, em termos relativos, a diferença de atractividade que o avaliador sente (de forma mais ou menos precisa) entre  $a$  e  $b$  tomando como referência a diferença de atractividade entre  $c$  e  $d$ .<sup>4</sup>

Uma tal escala  $v$ , a que chamamos *critério (de valor) cardinal*, satisfaz nomeadamente todas as condições necessárias para definir uma "função de valor mensurável" (*measurable value function*, [Dyer e Sarin, 1979]), no sentido em que  $v$  verifica, em particular, a propriedade:

$$\forall a, b, c, d \in A, v(a) - v(b) > v(c) - v(d) \text{ se e só se "a diferença de atractividade entre } a \text{ e } b \text{ é maior que a diferença de atractividade entre } c \text{ e } d".$$

Desde há muito que têm sido propostas numerosas vias para construir uma escala cardinal sobre  $A$ , em trabalhos teóricos e práticos nos domínios da matemática, da economia, das ciências sociais ou da psicologia (em particular, da psicofísica) - ver referências em [Fishburn, 1967], [von Winterfeldt e Edwards, 1986, §7.3], [Farquhar e Keller, 1989]. As mais utilizadas são as técnicas de "bissecção" (em termos de diferenças de preferência) e as técnicas de "pontuação directa" (*direct rating*<sup>5</sup>) (ver descrições simples de ambas em [Goodwin e Wright, 1991, capítulo 2]). O que mais chama a atenção em todos estes métodos de avaliação é a dificuldade do processo de interrogatório que todos seguem, o qual põe problemas complexos

3 Correctamente,  $v_j: A \rightarrow \mathfrak{R}: a \rightarrow v_j(a)$ ; para simplificar, omitiremos o índice  $j$  sempre que tal não gerar confusão.

4 Note-se que a *escala de valor não tem uma origem (um zero) natural* (cf. [von Winterfeldt e Edwards, 1986, p. 231]) - ela não é uma escala de razões.

5 [Guilford, 1954, cap. 11 descreve as técnicas de *direct rating* da psicofísica (ver também [Torgerson, 1958] e outras referências em [Fishburn, 1967, p. 438]). *SMART (Simple MultiAttribute Rating Technique)* de Edwards [1977] é a extensão multicritério do *direct rating* (ver, também, [Edwards e Newman, 1982], [von Winterfeldt e Edwards, 1986], [Edwards et al., 1988], [Buede e Choisser, 1992]).

de operacionalidade da noção de *intensidade de preferência*<sup>6</sup>. Do nosso ponto de vista, o problema reside sobretudo no facto de todos os métodos obrigarem o avaliador, mais ou menos explicitamente, a comparar diferenças de preferência entre dois pares de acções, em associação estrita com o conceito de *intensidade de preferência* introduzido por Pareto [1906] e Frish [1926]. Além disso, as propostas alternativas que se podem encontrar na literatura, como o recurso à noção de *troca*, ou a uma *dimensão exterior* ao problema (em particular, ao conceito de *willingness-to-pay* - cf. [Krantz et al., 1971], [Keeney e Raiffa, 1976], [Dyer e Lorber, 1982]), a *lotarias* ou à noção de *mundos paralelos* (cf. [Camacho, 1982] e [Vansnick, 1984]) não nos parecem simplificar, com vantagem prática sobre as técnicas da bissecção ou de *direct rating*, a formulação das questões postas. *Para procurar ultrapassar estas dificuldades, apresenta-se na sequência deste artigo uma nova abordagem ao problema da construção de um critério de valor cardinal sobre A a partir de juízos absolutos de diferença de atractividade.*<sup>7</sup>

### 3. MACBETH: Uma nova abordagem à construção de um critério cardinal

#### 3.1 Ideia de base e antecedentes

Uma ideia fundamental subjacente à concepção da nossa abordagem ao problema da construção de uma escala cardinal sobre *A* consiste em, ao contrário dos métodos referidos no §2, *não* pôr ao avaliador questões que envolvem quatro acções, do tipo "a diferença de atractividade entre *a* e *b* é maior, igual ou menor que a diferença de atractividade entre *c* e *d* ?". Para evitar os problemas inerentes a este tipo de questões, propomos, em alternativa, envolver apenas duas acções de cada vez, colocando ao avaliador perguntas mais simples que exigem dele apenas a elaboração de *juízos absolutos sobre a diferença de atractividade entre duas acções*, do tipo:

*Dados os impactos  $i_j(a)$  e  $i_j(b)$  de duas acções potenciais *a* e *b* de A segundo um ponto de vista fundamental  $PV_j$  (e, eventualmente os indicadores de dispersão  $\delta_j(a)$  e  $\delta_j(b)$ ), sendo a julgada mais atractiva (localmente) que *b*, a diferença de atractividade entre *a* e *b* é "fraca", "forte", ...?"*<sup>8</sup>

6 Ver críticas em [Fishburn, 1970, p. 81], [Machina, 1981, p. 169], [Sarin, 1983, p. 344], [White, 1985, pp. 334–335], [French, 1988, pp. 91–92], [Farquhar e Keller, 1989], [Roy e Bouyssou, 1993, § 4.4.3].

7 Partilhamos, assim, uma interpretação *intrínseca*, em termos de *diferença de atractividade*, do conceito de *intensidade de preferência* ("*strength of preference*", cf. [von Winterfeldt e Edwards, 1986, pp. 208–211]), evitando a interpretação em termos de *mutations* ([Roy, 1985]) ou *exchanges* (ver, por exemplo, [McCord e de Neufville, 1983]) que a nosso ver (e como nota French [1988, § 3.7 e § 9.3]) põe problemas pertinentes de falta de significação substantiva.

8 Como princípio de base para a utilização deste tipo de perguntas, fazemos nossas as considerações seguintes do filósofo Nicholas Rescher [1969, p. 70]: "When information of this sort can be elicited from *P* [o nosso avaliador] – and surely it will be available in many or most cases – we can proceed to construct on *P*'s behalf (even if *P* himself will not do so for us) a measure of *degree* of preference in order to capture and reflect with great fidelity the preference stance that *P* himself occupies vis-à-vis the *xi* [as nossas acções]. Note that we do not *elicit* the measure from *P*, but rather *construct* it on the basis of information elicited from *P*, doing this in such a way that we do not *impose* any preference commitments upon him but simply reflect those which he affords us."

Para facilitar o diálogo analista/avaliador, introduzimos uma *escala semântica* formada por algumas *categorias de diferença de atractividade*. Assim,  $\forall a, b \in A$  com  $a$  mais atractiva que  $b$  ( $a P b$ ), o avaliador é convidado a exprimir um juízo qualitativo absoluto sobre a diferença de atractividade entre  $a$  e  $b$ , afectando o par  $(a, b)$  a uma e uma só das categorias semânticas propostas.

O mesmo tipo de ideia fôra já avançada por Freeling [1983] e por Belton [1986a e b], na sequência das suas análises críticas do Método de Saaty [1977, 1980]. Convém pois explicar em que é que a nossa metodologia *MACBETH* (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation TecHnique*) se distingue muito claramente dos trabalhos de Saaty por um lado e de Freeling e Belton por outro. No que respeita a Saaty, é importante começar por realçar que a escala semântica que ele utiliza no seu método *não é*, ao contrário da que utilizamos em *MACBETH*, uma escala de *diferenças de atractividade*, mas sim uma escala de *racios de prioridade* (ou *importância*). Estes dois conceitos, *prioridade e importância*, são diferentes do conceito de *atractividade*, uma vez que não é possível descer abaixo de um grau nulo de prioridade ou de importância, enquanto que o conceito de *atractividade* admite um oposto: o de *repulsividade*. A desvantagem de trabalhar com um conceito *monopolar* (como o de prioridade ou o de importância) é que, neste caso, o *zero* não representa um *nível neutro*, tendo antes uma conotação nitidamente negativa, pois que representa "*the condition of maximal absence of something that is a genuine value*" [Rescher, 1969, p. 64]. Este facto pode gerar uma certa confusão no espírito de quem deve emitir juízos de valor e, portanto, põe problemas de falta de significação substantiva (agravados se se interpretarem as respostas às questões do tipo Saaty em termos de intensidade de preferência - cf. [Lootsma, 1993]). No que diz respeito, ao mesmo tempo, aos trabalhos de Saaty, Freeling e Belton, *MACBETH* distingue-se claramente nos pontos seguintes: O que fazem estes três autores apresenta um carácter não só muito restritivo mas também totalmente *arbitrário* na *passagem do semântico ao quantitativo*, uma vez que todos fazem corresponder a cada categoria, da escala semântica que introduzem, um e um só número real (ou, geometricamente, um e um só ponto de uma recta graduada) *arbitrariamente fixado* como medida da diferença de valor (em Freeling e Belton) ou do racio de prioridade (em Saaty) correspondente a essa categoria. Em *MACBETH*:

- por um lado, *é um intervalo da recta real que é associado a cada uma das categorias;*
- por outro lado, *este intervalo não é fixado a priori.*

A regra de codificação numérica que propomos consiste em associar a cada acção  $a$  de  $A$  um número real  $v(a)$  tal que as diferenças  $v(a) - v(b)$ , com  $a P b$ , sejam o mais possível compatíveis com os juízos absolutos de diferença de atractividade formulados pelo avaliador, no sentido em que, para todos os pares  $(a, b)$  afectados a uma mesma categoria, as diferenças  $v(a) - v(b)$  pertençam ao mesmo intervalo, sem que os intervalos correspondentes a categorias diferentes se sobreponham. De forma mais precisa, *à partição em categorias do conjunto dos pares ordenados  $(a,b)$  de  $A \times A$  tais que  $a P b$ , propomos associar uma partição da semi-recta*

dos reais positivos em intervalos, dois intervalos contíguos correspondendo a duas categorias consecutivas. No plano prático, para determinar estes intervalos basta definir os seus limites, os quais podem ser vistos como *limiares de diferença de valor* que fazem a transição entre categorias consecutivas.

Desta forma, *MACBETH* liga-se ao problema teórico da representação numérica de *semi-ordens múltiplas por limiares constantes*, problema estudado e resolvido por Doignon [1987] no caso geral. Seja  $(P^{(1)}, \dots, P^{(k)}, \dots, P^{(m)})$  uma estrutura de  $m$  relações binárias, em que  $P^{(k)}$  representa uma *relação de preferência tanto mais forte quanto  $k$  é grande*, sempre em termos de um dado ponto de vista fundamental  $PV_j$ . As semi-ordens múltiplas introduzem-se de maneira natural desde que se queira representar as preferências através de uma função  $v$  e de funções-limiares  $s_k$  tais que, por exemplo:

$$a P^{(k)} b \Leftrightarrow s_k < v(a) - v(b) < s_{k+1}.$$

No nosso caso, os *limiares  $s_k$  são constantes* reais positivas, que limitam os intervalos correspondentes às categorias semânticas  $C_k$  ( $k = 1, \dots, m$ ). Recorde-se que uma escala de diferenças de atractividade é uma escala limitada à esquerda, pelo seu zero, mas não limitada à direita (sendo  $a P^{(m)} b$ , é sempre teoricamente possível encontrar um nível de impacto definindo uma acção real ou fictícia  $c$  tal que  $c$  é preferível a  $b$  mais do que  $a$  é preferível a  $b$ ). Então, a *última* categoria  $C_m$  é não limitada à direita. Entre a origem  $s_1 = 0$  e  $s_m$  toda uma infinidade de limiares e, por conseguinte, de categorias, podem ser definidos.

No entanto, segundo Blumenthal [1977, p. 88] o número de nuances que uma pessoa é capaz de introduzir aquando da expressão de um juízo absoluto é muito limitado:

"These limits vary within a narrow range now commonly known as the magical number 7 plus-or-minus 2 following Miller's (1956) description".

O processo de interacção utilizado na abordagem *MACBETH* leva em conta estes conhecimentos. Concretamente, *MACBETH propõe ao avaliador que exprima os seus juízos absolutos de diferença de atractividade por uma de seis categorias ( $m = 6$ )<sup>9</sup>, de dimensão não necessariamente igual (ver figura 2):*

$C_1 \rightarrow$  *diferença de atractividade muito fraca;*

$C_2 \rightarrow$  *diferença de atractividade fraca;*

$C_3 \rightarrow$  *diferença de atractividade moderada;*

$C_4 \rightarrow$  *diferença de atractividade forte;*

$C_5 \rightarrow$  *diferença de atractividade muito forte.*

$C_6 \rightarrow$  *diferença de atractividade extrema.*

<sup>9</sup> 7 categorias, com a indiferença (diferença de atractividade nula) entre duas acções. Note-se que este número não é minimamente restritivo da aplicação do método nem da sua formulação matemática.

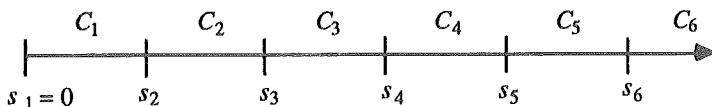


Figure 2 - Categorias de diferença de atractividade

Se o avaliador formou a convicção de que duas acções (ou mais) são igualmente atractivas, basta representar essas acções indiferentes por uma e uma só de entre elas no processo de avaliação absoluta por pares. Assim, para nos podermos concentrar na componente cardinal do problema, assumiremos neste artigo que existe já definida uma ordenação das acções de  $A$  por ordem decrescente de atractividade e que essa ordenação não contem *ex-aequo*. Tal corresponde a admitir verificada a hipótese  $H$  a seguir enunciada.

**Hipótese H:** Existe uma relação binária  $P$  definida em  $A$ , assimétrica, negativamente transitiva e conexa, que modeliza os juízos de atractividade de natureza ordinal do avaliador relativamente às acções de  $A$ .<sup>10</sup>

Na prática, sendo  $A = \{a_n, a_{n-1}, \dots, a_1\}$  o conjunto de  $n$  acções a avaliar, em que estas se apresentam já ordenadas por ordem decrescente de atractividade  $a_n P a_{n-1} P \dots P a_1$  sem *ex-aequo* (tendo em conta a hipótese  $H$ ), a primeira parte do processo de avaliação corresponde a preencher a sub-matriz triangular superior da matriz  $n \times n$  das respostas categorizadas:

$$\begin{matrix}
 & a_n & a_{n-1} & a_{n-2} & \cdot & \cdot & a_3 & a_2 & a_1 \\
 a_n & & x_{n, n-1} & x_{n, n-2} & \cdot & \cdot & x_{n, 3} & x_{n, 2} & x_{n, 1} \\
 a_{n-1} & & & x_{n-1, n-2} & \cdot & \cdot & x_{n-1, 3} & x_{n-1, 2} & x_{n-1, 1} \\
 \cdot & & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \cdot & & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \cdot & & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 a_3 & & & & \cdot & \cdot & & x_{3, 2} & x_{3, 1} \\
 a_2 & & & & \cdot & \cdot & & & x_{2, 1} \\
 a_1 & & & & \cdot & \cdot & & & 
 \end{matrix}$$

em que,  $\forall i > j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $x_{i,j}$  toma o valor  $k \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  se o avaliador afectar o par  $(a_i, a_j)$  à categoria  $C_k$ .

### 3.2 Consistência dos juízos absolutos formulados

A abordagem *MACBETH* propõe ao avaliador certas hipóteses lógicas de trabalho na elaboração dos seus juízos de diferença de atractividade entre acções, que se traduzem na verificação de aspectos relacionados com a *consistência* dos juízos expressos.

<sup>10</sup> Note-se, entretanto, que esta hipótese é de todo dispensável na aplicação prática da metodologia *MACBETH*.



Comecemos por notar que, se o avaliador afectou o par de acções  $(a, b)$ , com  $a P b$ , à categoria  $C_k$  e o par  $(b, c)$  à categoria  $C_{k'}$  tais que  $k > k'$ , isto deve significar, indirectamente, que para o avaliador  $a$  é mais atractiva que  $b$  mais do que  $b$  é mais atractiva que  $c$ , isto é, em termos de diferenças de valor,  $v(a) - v(b) > v(b) - v(c)$ . Nesta linha de raciocínio, é então lógico propôr, como hipótese de trabalho (*chave*) para a construção das preferências cardinais, que a diferença de valor  $v(a) - v(c)$  entre as acções  $a$  e  $c$  seja pelo menos tão grande como as diferenças de valor entre  $a$  e  $b$  e entre  $b$  e  $c$ . Um teste de consistência semântica entre termos de acções pode agora ser enunciado:

$$(a, b) \in C_k \text{ e } (b, c) \in C_{k'} \Rightarrow (a, c) \in C_{k''}, \text{ com } k'' \geq \max\{k, k'\}.$$

A verificação desta condição para todo o terno de acções tais que  $a P b P c$  garante que, se não existirem ciclos de inconsistência semântica entre três acções, não existirá seguramente nenhum ciclo de inconsistência semântica entre quatro ou mais acções. É claro que, o avaliador é semanticamente consistente nas suas respostas se, e só se, na matriz triangular superior dos julgamentos verbais, os valores  $x_{i,j}$  correspondentes não decrescerem em linha nem crescerem em coluna. Este tipo de teste insere-se perfeitamente na perspectiva interactiva de aprendizagem que defendemos para o apoio à decisão e a que qualquer ferramenta técnica deve subordinar-se (cf. [Bana e Costa, 1993]).

A nossa experiência empírica de utilização deste teste em casos reais tem mostrado que os avaliadores, ao ser-lhes assinalada uma inconsistência semântica, rapidamente revêem os juízos nela envolvidos, e que há medida que se vão familiarizando e aprendendo com o processo de avaliação por categorias, as situações de inconsistência reduzem-se significativamente.

Uma vez afectados todos os pares  $(a, b)$ , de acções de  $A$ , tais que  $a P b$ , a uma das 6 categorias semânticas  $C_1$  a  $C_6$  de diferença de atractividade, MACBETH procurará determinar simultaneamente, por programação linear:

- 6 números reais  $s_1$  a  $s_6$  que servirão de limites aos intervalos que representarão numericamente as 6 categorias semânticas,
- uma aplicação  $v(\cdot): A \rightarrow \mathfrak{R}$  fazendo corresponder a cada acção  $a \in A$  um número real  $v(a)$ ,

de tal forma que,  $\forall a, b \in A$  com  $a P b$ , as condições seguintes sejam satisfeitas:

$$0 = s_1 < s_2 < \dots < s_6 \quad (1)$$

$$\begin{cases} s_k < v(a) - v(b) < s_{k+1} & \text{sse } (a, b) \in C_k, k \neq 6, \\ s_6 < v(a) - v(b) & \text{sse } (a, b) \in C_6 \end{cases} \quad (2)$$

Mesmo quando a matriz de juízos absolutos é semanticamente consistente, para ela ser compatível com o tipo de representação numérica desejada - o mesmo é dizer, para que existam 6 números reais  $s_1$  a  $s_6$  e uma aplicação  $v(\cdot): A \rightarrow \mathfrak{R}: a \rightarrow v(a)$  satisfazendo as condições (1) e (2) - é necessário que os juízos do avaliador satisfaçam outros requisitos de consistência cardinal. De facto, é bem conhecido da teoria que a representação numérica de semi-ordens múltiplas por limiares constantes nem sempre é possível (cf. [Doignon, 1987]; ver também

[Cozzens e Roberts, 1982] e [Roy e Vincke, 1987]). Vejamos um exemplo simples. Seja  $A = \{a_5, a_4, a_3, a_2, a_1\}$  com as seguintes respostas do avaliador:

	$a_5$	$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_1$
$a_5$		2	2	5	6
$a_4$			1	3	4
$a_3$				2	4
$a_2$					3
$a_1$					

Deduz-se de  $(a_5, a_3) \in C_2$ ,  $(a_3, a_2) \in C_2$  e  $(a_5, a_2) \in C_5$  que se deveria ter  $s_4 < 2.s_2$  e de  $(a_4, a_2) \in C_3$ ,  $(a_2, a_1) \in C_3$  e  $(a_4, a_1) \in C_4$  que se deveria ter  $2.s_2 < s_4$ , o que é evidentemente impossível.

### 3.3 MACBETH, um método interativo; formulação matemática

MACBETH foi concebido para ser utilizado como um *método interativo* de apoio à construção de uma escala cardinal sobre um conjunto  $A$  de acções, através da resolução, tecnicamente encadeada, de quatro programas lineares,  $Mc1$  a  $Mc4$  (figura 4), inicialmente formulados em [Bana e Costa e Vansnick, 1994] e para os quais propomos aqui uma nova formulação mais simples. O programa  $Mc1$ , o primeiro a ser utilizado, analisa a consistência cardinal do conjunto dos juízos de diferença de atractividade dados pelo avaliador, isto é, se existem limiares constantes  $s_1 = 0, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$  e uma aplicação  $v(\cdot) : A \rightarrow \mathfrak{R} : a \rightarrow v(a)$  verificando as condições (1) e (2). Matematicamente, o problema pode ser assim formulado:

#### Problema 1:

*Restrições:*

- r0) todas as variáveis  $\geq 0$ ;
- r1)  $s_1 = 0$
- r2)  $v(a_1) = 0$  em que  $\forall a \in A, a P a_1$   
(o valor atribuído à acção menos atractiva  $a_1$  é fixado igual a 0, o que não é restritivo);
- r3)  $\forall k \in \{2, 3, 4, 5, 6\} : s_k - s_{k-1} \geq 1000$
- r4)  $\forall k \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}, \forall (a, b) \in C_k : v(a) - v(b) \geq s_k + 1 - c$
- r5)  $\forall k \in \{1, 2, 3, 4, 5\}, \forall (a, b) \in C_k : v(a) - v(b) \leq s_{k+1} - 1 + c.$

*Função-objectivo:* Minimizar  $c$

(a diferença de atractividade entre duas acções deve estar, se possível, no intervalo correspondente à categoria respectiva;  $c$  é uma variável auxiliar - ver figura 3).

Se a solução do problema 1 for  $c_{min} = 0$ , o conjunto dos juízos dados pelo avaliador é consistente e, portanto, existe uma função-critério cardinal compatível com esses juízos, sendo uma solução dada pelo programa  $Mc2$ . Caso contrário, se  $c_{min} > 0$ , há inconsistência nos juízos dados, isto é, para se encontrar uma representação numérica do tipo desejado é

necessário modificar algum ou alguns dos juízos iniciais, para o que se poderá seguir sugestões dadas pelos programas *Mc3* e *Mc4*. O resultado do programa *Mc1* é, assim, o valor de um indicador de inconsistência  $c_{min}$ , que (contrariamente ao índice de inconsistência proposto por Saaty no seu método) tem uma significação substantiva simples e directa.

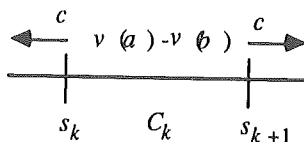


Figura 3 - Função da variável  $c$

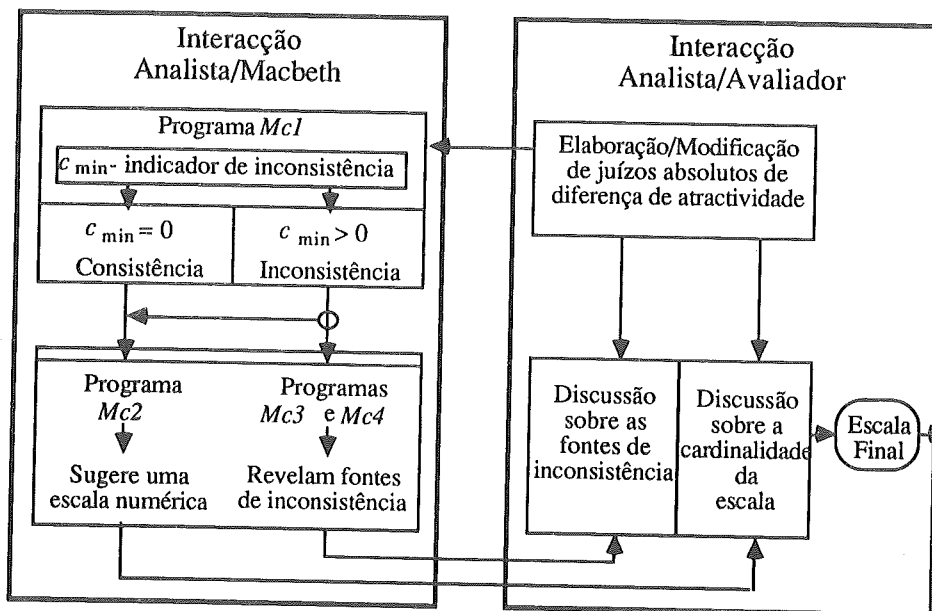


Figura 4 - Esquema de interação MACBETH

O programa *Mc2* determina números reais  $s_1 = 0, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$  e  $v(a)$  ( $a \in A$ ) que satisfazem as restrições  $r1$  a  $r5$  depois de substituir em  $r4$  e  $r5$  a variável  $c$  pelo valor  $c_{min}$  determinado pelo programa *Mc1*. A formulação do problema resolvido por *Mc2* é:

**Problema 2:**

Restrições:

$r0, r1, r2, r3$  do problema 1;

$r4') \forall k \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}, \forall (a, b) \in C_k: v(a) - v(b) \geq s_{k+1} - c_{min}$

$r5') \forall k \in \{1, 2, 3, 4, 5\}, \forall (a, b) \in C_k: v(a) - v(b) \leq s_{k+1} - 1 + c_{min}$

$r6) \forall k \in \{1, 2, 3, 4, 5\}, \forall (a, b) \in C_k: v(a) - v(b) = (s_k + s_{k+1})/2 + \epsilon(a, b) - \eta(a, b)$   
(ver figura 5);

$r7) \forall (a, b) \in C_6: v(a) - v(b) = s_6 + 1 - \alpha(a, b) + \delta(a, b).$

**Função-objectivo:** 
$$\text{Min } \left\{ \sum_{\substack{(a,b) \in C_k, \\ k \in \{1,2,3,4,5\}}} [\varepsilon(a,b) + \eta(a,b)] + \sum_{(a,b) \in C_6} \alpha(a,b) \right\}$$

(a diferença de valor entre duas acções da categoria  $C_k$  ( $k \neq 6$ ) deve ser o mais próxima possível da diferença de valor entre outro par de  $C_k$  e ao mesmo tempo o mais afastada possível da diferença de valor entre acções de outra categoria, o que é traduzido pela tentativa de centrar  $v(a) - v(b)$  o mais possível no intervalo associado à categoria respectiva; note-se que em qualquer solução básica do programa linear correspondente se tem sempre  $\varepsilon(a, b), \eta(a, b) = 0$ ).

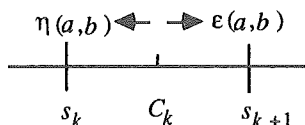


Figura 5 - Função das variáveis  $\eta(a, b)$  e  $\varepsilon(a, b)$  para  $C_k$  ( $k \neq 6$ )

Quando  $c_{min} = 0$ , isto é, quando o conjunto dos juízos dados pelo avaliador é consistente, o processo de interacção pode entrar directamente numa fase de discussão centrado sobre a validação da *condição 1* (cf. §2) pela escala dos valores  $v(a), a \in A$ , dada pelo programa *Mc2*. Uma forma de apresentar ao avaliador os valores  $v(a)$  consiste numa representação gráfica em que cada acção  $a$  de  $A$  é colocada sobre um eixo vertical do modo seguinte:

- 1)  $\forall a, b \in A, a$  é colocada mais acima que  $b$  se e só se  $a P b$
- 2)  $\forall a, b, c, d \in A$  com  $a P b$  e  $c P d$ , o quociente [distância entre os pontos  $a$  e  $b$ ] / [distância entre os pontos  $c$  e  $d$ ] é igual ao quociente [ $v(a) - v(b)$ ] / [ $v(c) - v(d)$ ].

Por outro lado, se  $c_{min} > 0$ , isto é, quando há inconsistência nos juízos de diferença de atractividade dados pelo avaliador, os valores  $v(a), a \in A$ , dados pelo programa *Mc2*, "conciliam" os juízos inconsistentes. Estes valores podem ser apresentados ao avaliador, passando-se directamente à fase de validação da escala. Um procedimento alternativo, mais prudente e adequado a uma perspectiva interactiva de aprendizagem no apoio à decisão, consiste em re-analisar dos juízos iniciais, discutindo com o avaliador as possíveis modificações que ele estará disposto a fazer por forma a tentar ultrapassar os problemas de inconsistência. É com o objectivo de facilitar esta fase de discussão que foram concebidos os programas *Mc3* e *Mc4* que evidenciam possíveis causas de inconsistência.

Tecnicamente, os programas *Mc3* e *Mc4* resolvem, respectivamente, os problemas 3 e 4, com a mesma função-objectivo e que apenas diferem no facto de as restrições  $r4'$  e  $r5'$  fazerem apenas parte do problema 3:

**Restrições do problema 3:**

$r0, r1, r2, r3, r4', r5'$  do problema 2;

$r8) \forall k \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}, \forall (a, b) \in C_k: v(a) - v(b) = s_k + 1 - \alpha(a, b) + \delta(a, b)$

$r9) \forall k \in \{1, 2, 3, 4, 5\}, \forall (a, b) \in C_k: v(a) - v(b) = s_{k+1} - 1 + \beta(a, b) - \gamma(a, b).$

Restrições do problema 4:  $r_0, r_1, r_2, r_3, r_8$  e  $r_9$ .

Função-objectivo comum aos problemas 3 e 4:

$$\text{Min} \left\{ \sum_{\substack{(a,b) \in C_k, \\ k \in \{1,2,3,4,5\}}} \beta(a,b) + \sum_{\substack{(a,b) \in C_k, \\ k \in \{2,3,4,5,6\}}} \alpha(a,b) \right\}$$

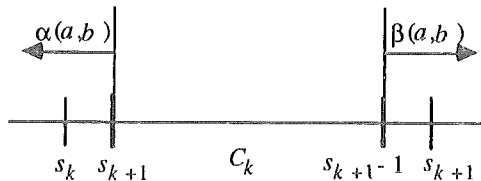


Figura 6 - Função das variáveis  $\alpha(a, b)$  e  $\beta(a, b)$  para  $C_k$  ( $k \neq 6$ )

Ao minimizar a soma das variáveis  $\alpha(a, b)$  e  $\beta(a, b)$  os programas *Mc3* e *Mc4* fazem ressaltar pares de acções cuja afectação às categorias respectivas especificadas pelo avaliador introduz problemas de inconsistência. Esses pares são aqueles para os quais resultam valores de  $\alpha(a, b)$  ou de  $\beta(a, b)$  diferentes de zero na solução óptima dos problemas 3 e 4, respectivamente (ver figura 6). É evidente que em qualquer solução dos programas lineares correspondentes ter-se-á sempre  $\alpha(a, b) \cdot \beta(a, b) = 0$  e que em caso de consistência ( $c_{min} = 0$ ) todas estas variáveis auxiliares são nulas. A diferença entre as soluções óptimas destes dois problemas tem a ver com o facto de se restringirem (problema 3) ou não (problema 4) as soluções possíveis a valores das variáveis  $\alpha(a, b)$  e  $\beta(a, b)$  não superiores ao valor de  $c_{min}$ , pela introdução ou não das restrições  $r_4'$  e  $r_5'$ . Finalmente, é importante ter presente que, numa via construtiva de apoio à decisão, as sugestões de modificação de juízos têm um carácter estritamente indicativo (não normativo).

#### 4. Aplicação de MACBETH no caso da concepção de uma boa alternativa de ligação ferroviária ao porto de Lisboa

A nova ligação ferroviária ao porto de Lisboa tem vivido, ao longo dos últimos anos, numa situação de impasse, provocada por um conflito de pontos de vista entre as entidades envolvidas. Entretanto, a elaboração do Plano de Urbanização do Vale de Alcântara veio criar condições para a concepção de uma nova alternativa de consenso, levando em conta os sistemas de valores dos vários intervenientes. Bana e Costa e Nunes da Silva [1994] descrevem a metodologia multicritério seguida para apoiar a equipa do plano na construção de uma "boa" solução, a partir do estudo dos impactos das alternativas existentes.

Da fase de estruturação resultou uma família  $F = \{PV_j, j = 1, \dots, n\}$  de  $n = 9$  pontos de vista fundamentais e um conjunto  $I_j$  de níveis de impacto plausíveis segundo cada  $PV_j$  - chamado "descriptor de impactos" - que permitiu definir o impacto  $i_j(a)$  de cada acção potencial  $a$  segundo cada  $PV_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ). Em cada  $I_j$  identificou-se um nível de impacto neutro  $i_{0j}$  - isto é, um nível considerado nem atractivo nem repulsivo segundo  $PV_j$ .

Para ilustrar a aplicação da abordagem *MACBETH*, retivemos no quadro I apenas os elementos correspondentes aos pontos de vista  $PV_2$ ,  $PV_7$  e  $PV_8$ , os únicos em que os juízos absolutos respectivos expressos pelo avaliador apresentavam problemas de inconsistência.

Pontos de vista fundamentais	Descritores de impactos	
$PV_2$ Efeito de corte de tecido urbano	$I_2$	Comprimento do atravessamento à superfície em viaduto ou em vala aberta, em áreas consolidadas (metros) Melhor nível = 0 metros Nível neutro = 400 metros Pior nível = 1200 metros
$PV_7$ Conflitualidade com infraestruturas exist. ou previstas	$I_7$	Sobreposição do traçado com as três principais infraestruturas de transportes da zona (escala qualitativa) Nível de impacto: Descrição: ++ Nenhuma interferência + Não interfere com a Av. de Ceuta e interfere com uma só das 2 outras infraestruturas (ramal de Alcântara ou acesso ao porto) o (neutro) Não interfere com a Av. de Ceuta e interfere com as 2 outras infraestruturas (ramal de Alcântara e acesso ao porto) - Interfere com a Av. de Ceuta e interfere com uma só das 2 outras infraestruturas (ramal de Alcântara ou acesso ao porto) -- Interfere com todas as três infraestruturas
$PV_8$ Faseamento da construção	$I_8$	Possibilidade de fasear a construção e implicações com o ramal de Alcântara (escala qualitativa) Nível de impacto: Descrição: ++ É possível fasear a obra em todos os seus troços mantendo a funcionar o ramal de Alcântara + É possível fasear a obra em apenas dois dos seus troços mantendo a funcionar o ramal de Alcântara o (neutro) Não permite fasear mas é possível manter a funcionar o ramal de Alcântara - É possível fasear a obra em apenas dois dos seus troços não mantendo a funcionar o ramal de Alcântara -- Não permite fases e não é possível manter a funcionar o ramal de Alcântara

Quadro I - Pontos de vista e descritores

O descritor  $I_2$  de impactos segundo  $PV_2$  é *quantitativo* e *indirecto* ("proxy-attribute" na terminologia de Keeney [1992, p. 103]), enquanto  $I_7$  e  $I_8$  são descritores *construídos*, de que se mostram no quadro I os respectivos níveis. Por sua vez, o quadro II mostra os impactos

$i_2(a)$ ,  $i_7(a)$  e  $i_8(a)$  (todos pontuais) de cada uma das 9 soluções existentes ( $a = a_1, \dots, a_9$ ) sobre os 3 pontos de vista fundamentais.

Impactos	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$
$i_2$ (metros)	1200	1020	400	260	300	580	700	1120	0
$i_7$	+	+	++	+	++	+	-	-	++
$i_8$	o	--	o	o	o	o	o	-	o

Quadro II - Impactos

→	$a_4$ (260 m)	$a_5$ (300 m)	$a_3$ (400 m)	$a_6$ (580 m)	$a_7$ (700 m)	$a_2$ (1020 m)	$a_1$ (1200 m)
$a_9$ (0 m)	4	5	5	5	6	6	6
$a_4$ (260 m)		1	2	3	4	5	6
$a_5$ (300 m)			2	2	4	4	5
$a_3$ (400 m)				2	2	4	4
$a_6$ (580 m)					2	3	4
$a_7$ (700 m)						2	2
$a_2$ (1020 m)							1

Quadro III - Matriz de juízos absolutos de diferença de atractividade segundo  $PV_2$

→	+	o	-	--
++	5	5	5	6
+		4	5	6
o			4	5
-				4

→	+	o	-	--
++	3	3	5	6
+		4	4	6
o			4	5
-				4

Quadro IV - Juízos iniciais segundo  $PV_7$

Quadro V - Juízos iniciais segundo  $PV_8$

As funções-critérios cardinais  $v_2$ ,  $v_7$  e  $v_8$  foram construídas a partir das respostas iniciais do avaliador (a equipa do plano) ao questionário *MACBETH*. As respectivas matrizes de juízos absolutos categorizados são mostradas nos quadros III a V. Segundo os pontos de vista  $PV_7$  e  $PV_8$  foram comparados os pares de níveis dos descritores respectivos, enquanto que os juízos segundo  $PV_2$  se reportam directamente aos pares de acções ( $a, b$ ) tais que  $a P b$ .

Numa primeira análise dos impactos segundo  $PV_2$ , o avaliador considerou difícil de avaliar diferenças de dois impactos inferiores a  $\delta_2 = 10\%$  do maior deles, face à indeterminação inerente ao facto do descritor  $I_2$  ser indirecto e à imprecisão do processo de cálculo dos

impactos  $i_2(a)$  - medição em carta; deste modo a alternativa  $a_8$  não entrou no processo de avaliação inicial, dado que  $i_2(a_1) - i_2(a_8) = 80\text{m}$  é menor que  $0.10 \times 1200\text{m}$ .

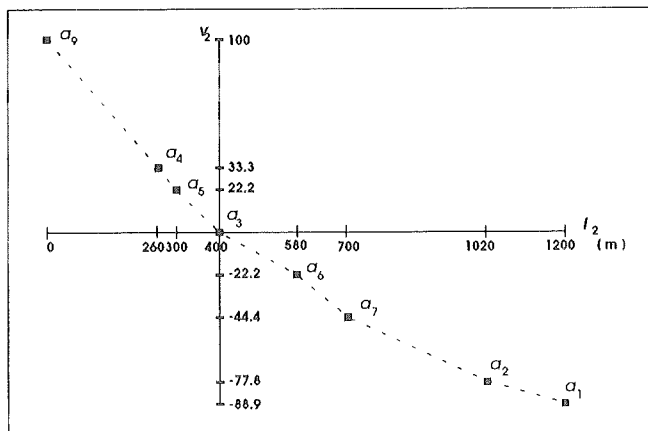


Figura 7 - Função-critério segundo  $PV_2$

O conjunto dos juízos de diferença de atractividade segundo  $PV_2$  é semanticamente consistente, como se constata facilmente no quadro III observando que as categorias dos juízos não decrescem da esquerda para a direita em cada linha, nem crescem de cima para baixo em cada coluna. Passou-se então à aplicação dos programas *MACBETH*, sendo  $c_{min} = 1 (> 0)$  o resultado do programa *Mc1*, o que mostra que existem problemas de inconsistência cardinal. Em conformidade, o analista perguntou ao avaliador se aceitava rever algum dos juízos iniciais, tendo este referido que tinha dúvidas sobre o juízo  *muito forte* entre as acções  $a_9$  e  $a_5$ , precisamente um dos destacados pelo programa *Mc4* como fonte de inconsistência, sugerindo baixá-lo para a categoria *forte*.

Introduzida esta alteração, procedeu-se de novo à aplicação dos programas *MACBETH*, para dar sequência ao processo interactivo de discussão (figura 4). O resultado de *Mc1* é agora  $c_{min} = 0$ , mostrando que os problemas de inconsistência foram ultrapassados, podendo pois passar-se à discussão da escala numérica  $v$  proposta pelo programa *Mc2* (re-escalada na figura 7 por forma a que  $v_2$ (nível neutro) = 0 e  $v_2$ (melhor nível) = 100). Note-se que, se  $i_2(a_2)$  fosse 550 m em vez de 580 m (diferença inferior ao indicador de dispersão  $\delta_2$ ) a função  $v_2$  resultaria linear entre  $a_3$  e  $a_7$ . Uma vez validada a cardinalidade da escala,  $v_2(a_8)$  foi definido por interpolação linear.

No que respeita ao ponto de vista  $PV_7$ , o conjunto dos juízos de diferença de atractividade entre os seus níveis de impacto (ver quadro IV) embora seja semanticamente consistente, apresenta também, como no caso anterior, problemas de inconsistência cardinal, pois que  $c_{min} = 1 (> 0)$ . No entanto, agora, o avaliador preferiu manter os seus juízos iniciais e discutir directamente sobre a escala numérica proposta pelo programa *Mc2*, cujos valores são



apresentados na figura 8, marcados sobre um eixo vertical, com indicação dos juízos iniciais entre níveis consecutivos.

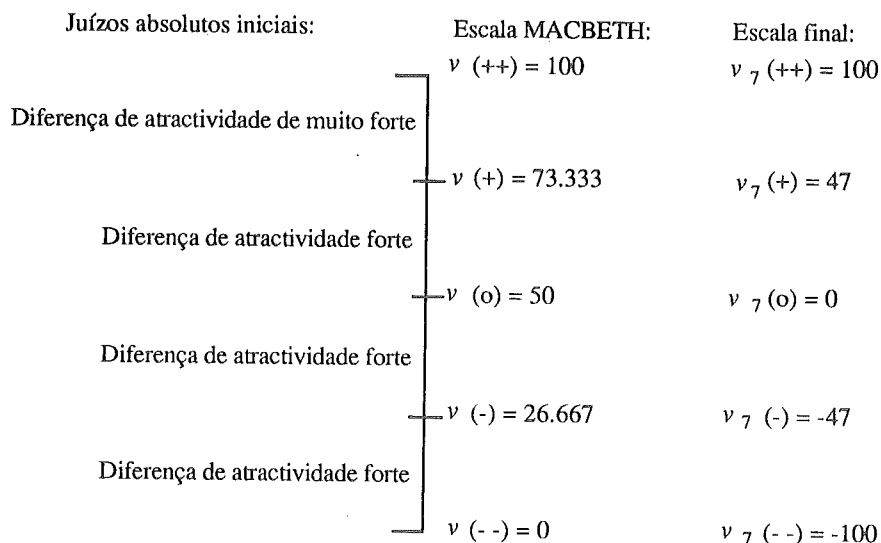


Figura 8 - Escala de diferença de valor segundo  $PV_7$

Note-se que  $v(++)-v(+)>v(+)-v(o)=v(o)-v(-)$ , respeitando os juízos iniciais. Mas, no entanto,  $v(-)-v(-)=v(++)-v(+)$ , o que fez o avaliador reflectir sobre o seu juízo *forte* entre os dois níveis "negativos", do que concluiu que sentia de facto uma diferença de atractividade tão forte entre estes como entre os dois níveis "positivos". Por fim, foi discutido o facto de, ao juízo *muito forte* dado para o par  $(+, -)$ , *Mc2* fazer corresponder uma diferença de valor igual à entre os níveis  $+ e -$ , cujo juízo é *extremo*. Neste caso, o avaliador disse que não o repugnaria muito baixar o seu juízo inicial entre  $+ e -$  para *muito forte*, embora achasse que os dois pares estariam ambos *somewhere* entre *muito forte* e *extremo*, tal como aliás identicamente colocaria os pares  $(++, +)$  e  $(-, -)$  ambos entre *forte* e *muito forte*. Curiosamente, ou não, quando aplicado ao conjunto de juízos do quadro IV, o programa *Mc3* coloca, precisamente, por um lado,  $(++, -)$  e  $(+, -)$  sobre a fronteira  $s_6$  entre  $C_5$  e  $C_6$  e, por outro lado,  $(++, +)$  e  $(-, -)$  sobre o limiar  $s_5$  que separa  $C_4$  de  $C_5$ . Aliás, *Mc2* faz exactamente o mesmo, como se mostra na figura 9, em que os resultados foram marcados sobre a semi-recta dos reais positivos. Uma vez aceite a escala  $v$ , procedeu-se, finalmente, à sua transformação linear, por forma a ter-se  $v_7(o) = 0$  e  $v_7(++)= 100$  (ver figura 8).

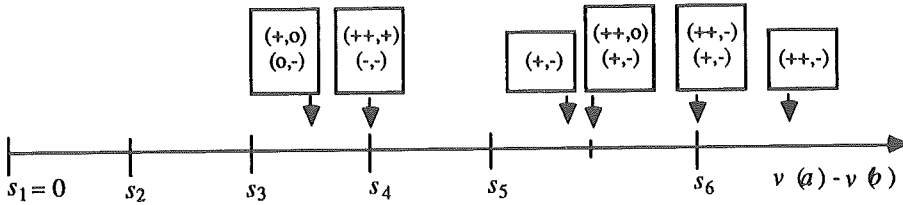


Figura 9 - Representação geométrica dos resultados de  $Mc2$  para os juízos segundo  $PV_7$

→	+	o	-	--	
++	[	3	4	5	6
+			4	4	6
o				4	5
-					4
	]				

Quadro VI - Juízos revistos segundo  $PV_8$

	$v(++)=100$	$v_8(++)=100$
	$v(+)=82.1$	$v_8(+)=55$
	$v(o)=60.7$	$v_8(o)=0$
	$v(-)=39.3$	$v_8(-)=-55$
	$v(--)=0$	$v_8(--)= -155$

Figura 10 - Escala de diferença de valor segundo  $PV_8$

No que respeita aos juízos de diferença de atractividade entre os níveis de impacto do descriptor  $I_8$  do ponto de vista  $PV_8$  (ver quadro V), é fácil verificar que existe um problema de inconsistência semântica na sequência  $(++, +) \in C_3$ ,  $(+, o) \in C_4$  e  $(++, o) \in C_3$ . Quando confrontado com esta situação, o avaliador estendeu mudar  $(++, +)$  de  $C_3$  para  $C_4$ , o que resolve o problema de inconsistência semântica.

Como nenhuma outra modificação foi introduzida, passou-se à análise da consistência cardinal do conjunto de juízos revistos (tabela VI). O resultado de  $Mc1$  é  $c_{min} = 0$ , o que mostra que se está perante juízos consistentes, pelo que se passou à discussão da escala numérica proposta por  $Mc2$ , mostrada na figura 10. Uma vez aceite pelo avaliador, foi a mesma reescalada por forma a ter-se  $v_8(o) = 0$  e  $v_8(++)= 100$ .

## 5. Conclusões

A abordagem *MACBETH*, apresentada neste artigo, é uma ferramenta potente para ultrapassar os problemas operacionais reconhecidos na aplicação das técnicas tradicionais de construção de critérios de valor cardinal. Baseada em juízos semânticos sobre a diferença de atractividade sentida por um avaliador entre pares de elementos de um conjunto, *MACBETH* testa a consistência dos juízos expressos, detecta fontes de inconsistência, quando esta existe, facilitando a revisão dos juízos em causa, e propõe uma escala numérica compatível com os juízos absolutos do avaliador.

Embora *MACBETH* seja uma abordagem de desenvolvimento recente, existem já várias aplicações práticas bem sucedidas em casos reais de apoio à decisão, de que é exemplo o caso apresentado neste artigo. Em [Bana e Costa *et al.*, 1995] apresenta-se um outro caso interessante, em que *MACBETH* foi utilizado para ajudar a definir os coeficientes de ponderação dos critérios de apreciação das propostas apresentadas a um grande concurso internacional de obras públicas, no quadro de um modelo de agregação aditivo. Também em [Bana e Costa *et al.*, 1994] se descreve uma aplicação no âmbito da concepção de um modelo multicritério de definição de prioridades de intervenção na reparação do parque habitacional da Câmara Municipal de Lisboa.

Os programas lineares *Mc1* a *Mc4* estão, de momento, implementados informaticamente em *GAMS-MINOS* (*General Algebraic Modeling System*, cf. [Brooke *et al.*, 1992]) sendo os respectivos tempos de resolução dos 4 programas encadeados, num *PC-486/33*, inferiores a 3 segundos para matrizes 10 por 10 (45 juízos). Entretanto, um protótipo não dependente de *GAMS* está actualmente em fase de programação, contando-se concluir uma versão 0 do *package MACBETH* ainda em 1995.

Note-se, por fim, que embora o método tenha sido apresentado com base na noção de atractividade, ele é também facilmente generalizável a outro tipo de conceitos, como seja a construção de escalas de *credibilidade*.

## Referências

- [1] Bana e Costa, C.A. (1990) (ed.), *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, Springer-Verlag.
- [2] Bana e Costa, C.A. (1993), Três convicções fundamentais na prática do Apoio à Decisão, *Pesquisa Operacional* 13-1, 9-20.
- [3] Bana e Costa, C.A., Oliveira, R.C., Matos, J.C., Alvarez, M.L. (1994), Concepção de um sistema multicritério de definição de prioridades de intervenção/conservação do património habitacional da C.M.L., *Actas do 2º ENCORE*, LNEC, Lisboa, 925-934.
- [4] Bana e Costa, C.A., Nunes da Silva, F. (1994), Ligação ferroviária ao porto de Lisboa: uma aplicação da Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão e à Negociação, *Investigação Operacional* 14, 115-131.
- [5] Bana e Costa, C.A., Vansnick, J.C. (1994), *MACBETH - An interactive path towards the construction of cardinal value functions*, *International Transactions in Operations Research* 1, 489-500.
- [6] Bana e Costa, C.A., Antunes Ferreira, J.A., Vansnick, J.C. (1995), Avaliação multicritério de propostas: o caso de uma nova linha do metropolitano de Lisboa, *Revista de Transportes e Tecnologia* (em edição).
- [7] Belton, V. (1986a), A comparative study of methods for multiple criteria decision aiding, *Thèse de Doctorat*, University of Cambridge.
- [8] Belton, V. (1986b), A comparison of the analytic hierarchy process and a simple multiattribute value function, *Eur. J. Opl. Res.* 26, 7-21.
- [9] Blumenthal, A.L. (1977), *The Process of Cognition*, Prentice-Hall.

- [10] Brams, S.J., Fishburn, P.C. (1983), *Approval Voting*, Birkhäuser.
- [11] Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A. (1992), *GAMS :A User's Guide*, Release 2.25, The Scientific Press.
- [12] Buede, D.M., Choisser, R.W. (1992), Providing an analytic structure for key system design choices, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 1, 17-27.
- [13] Camacho, A. (1982), *Societies and Social Decision Functions. A Model with Focus on the Information Problem*, Reidel.
- [14] Cozzens, M.B., Roberts, F.S. (1982), Double Semiorders and Double Indifference Graphs, *SIAM Journal of Algebraic Discrete Methods* 3, 566-583.
- [15] Doignon, J.-P. (1987), Threshold Representations of Multiple Semiorders, *SIAM Journal of Algebraic Discrete Methods* 8, 77-84.
- [16] Dyer, J.S., Lorber, H.W. (1982), The multiattribute evaluation of program-planning contractors, *OMEGA* 10, 673-678.
- [17] Dyer, J.S., Sarin, R.K. (1979), Measurable multiattribute value functions, *Ops. Res.* 27, 810-822.
- [18] Edwards, W. (1977), Use of multiattribute utility measurement for social decision making, em D.E. Bell, R.L. Keeney, H. Raiffa (eds.), *Conflicting Objectives in Decisions*, John Wiley, 247-276.
- [19] Edwards, W., Newman, J.R. (1982), *Multiattribute Evaluation*, Sage.
- [20] Edwards, W., von Winterfeldt, D., Moody, D.L. (1988), Simplicity in decision analysis: an example and a discussion, em D.E. Bell, H. Raiffa, A. Tversky (eds.), *Decision Making: Descriptive, Normative, and Prescriptive Interactions*, Cambridge University Press, 443-464.
- [21] Farquhar, P.H., Keller, L.R. (1989), Preference intensity measurement, em P.C. Fishburn and I.H. LaValle (eds.), *Choice under Uncertainty*, J.C. Baltzer AG, 205-217.
- [22] Fishburn, P.C. (1967), Methods of estimating additive utilities, *Mgmt. Sci.* 13, 435-453.
- [23] Fishburn, P.C. (1970), *Utility Theory for Decision Making*, John Wiley.
- [24] Freeling, A.N.S. (1983), *Belief and decision aiding*, Tese de Doutorado, University of Cambridge.
- [25] French, S. (1988), *Decision Theory: An Introduction to the Mathematics of Rationality*, Ellis Horwood Limited.
- [26] Frisch, R. (1926), "Sur un problème d'économie pure", *Norsk Matematisk Forenings Skrifter Serie 1*, 16 1-40. Traduzido para Inglês por J.S. Chipman (1971), On a problem in Pure Economics, em J.S. Chipman, L. Hurwicz, M.K. Richter, H.F. Sonnenschein (eds.) *Preferences, Utility, and Demand*, Harcourt Brace Jovanovich, 386-423.
- [27] Goodwin, P., Wright, G. (1991), *Decision Analysis for Management Judgement*, John Wiley.
- [28] Guilford, J.P. (1954), *Psychometric Methods (Second Edition)*, Tata McGraw-Hill (First Edition, 1936, McGraw-Hill).
- [29] Keeney, R.L. (1992), *Value-Focused Thinking: A Path to Creative Decisionmaking*, Harvard University Press.
- [30] Keeney, R.L., Raiffa, H. (1976), *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*, John Wiley.
- [31] Krantz, D.H., Luce, R.D., Suppes, P., Tversky, A. (1971), *Foundations of Measurement*, Vol.1, Academic Press.
- [32] Lootsma, F.A. (1993), Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 2, 87-110.
- [33] Machina, M.J. (1981), 'Rational' decision making versus 'rational' decision modelling?, *J. Math. Psychol.* 24, 163-175.
- [34] McCord, M., de Neufville, R. (1983), Empirical demonstration that expected utility decision analysis is not operational, em B.P. Stigum, F. Wenstøp (eds.), *Foundations of Utility and Risk Theory with Applications*, Reidel, 181-199.
- [35] Miller, G.A. (1956), The magic number seven plus or minus two: some limits on the capacity for processing information, *Psych. Rev.* 63, 81-97.
- [36] Pareto, V. (1906), *Manuale di Economia Politica, con une Introduzione ulla Scienza Sociale*, Societa Editrice Libreria, Milan. (Em Françês: *Manuel d'Economie Politique*, Marcel Giard, 2ème édition, 1927. Em Inglês : *Manual of Political Economy*, Kelley).
- [37] Rescher, N. (1969), *Introduction to Value Theory*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- [38] Roberts, F.S. (1979), *Measurement Theory with Applications to Decision-making, Utility and the Social Sciences*, Addison-Wesley.
- [39] Rosenhead, J. (ed.) (1989), *Rational Analysis for a Problematic World*, John Wiley.
- [40] Roy, B. (1985), *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*, Economica.
- [41] Roy, B. (1990), The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods, em [Bana e Costa, 1990], 155-183.
- [42] Roy, B., Bouyssou, D. (1993), *Aide Multicritère à la Décision: Méthodes et Cas*, Economica.
- [43] Roy, B., Vincke, Ph. (1984), Relational systems of preference with one or more pseudo-criteria: some new concepts and results, *Mgmt. Sci.* 30, 1323-1335.

- [44] Roy, B., Vincke, P. (1987), Pseudo-orders: Definition, Properties and Numerical Representation, *Mathematical Social Sciences* 14, 263-274.
- [45] Saaty, T.L. (1977), A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures, *Journal of Mathematical Psychology* 15, 234-281.
- [46] Saaty, T.L. (1980), *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill.
- [47] Sarin, R.K. (1983), Measurable value function theory :survey and open problems, em P. Hansen (ed.), *Essays and Surveys on Multiple Criteria Decision Making*, Springer-Verlag, 337-346.
- [48] Stevens, S.S. (1946), On the theory of scales of measurement, *Science* 103, 677-680.
- [49] Tomlinson, R., Kiss, I. (eds.) (1984), *Rethinking the Process of Operational Research and Systems Analysis*, Pergamon Press.
- [50] Torgerson, W.S. (1958), *Theory and Methods of Scaling*, John Wiley (reprint edition, 1985).-
- [51] White, D.J. (1985), *Operational Research*, John Wiley.
- [52] Von Winterfeldt, D., Edwards, W. (1986), *Decision Analysis and Behavioral Research*, Cambridge University Press.
- [53] Vansnick, J.-C. (1984), Strength of preference - theoretical and practical aspects, em J.-P. Brans (ed.), *Operational Research'84*, North-Holland, 449-463.



# UM MODELO DE REGRESSÃO LOGÍSTICA APLICADO AO ESTUDO DO INSUCESSO ESCOLAR

**António Sabino Vilaça**

ISEL - Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação

**Rui Carvalho Oliveira**

CESUR - Dep. Eng<sup>a</sup> Civil - Instituto Superior Técnico

## **Abstract**

This paper presents the main results of a study on the educational failure rate at the lower secondary level, using logistic regression as the approach methodology.

The formulation and fitting of binary-choice models (logit) are carried out for several partitions of Portugal, until a single model for the entire Portuguese continent is obtained.

The most significant variables are then systematically analysed, with the dual objective of interpreting and confirming the results of the models.

## **Resumo**

Apresentam-se neste trabalho os resultados principais de um estudo sobre o insucesso escolar, ao nível do segundo ciclo do ensino básico, utilizando a regressão logística como metodologia de abordagem.

A formulação e o ajustamento de modelos de escolha binária (logit) são feitos sucessivamente para várias partições do território, até chegar a um modelo único para todo o Continente.

As variáveis explicativas são então analisadas de um modo sistemático, procurando simultaneamente interpretar e confirmar os resultados fornecidos pelos modelos.

## **Keywords**

binary choice models, logistic regression, educational failure

## **1. Introdução**

Pretendeu-se com este trabalho dar um contributo para o estudo do insucesso escolar, ao nível do segundo ciclo do ensino básico, através da obtenção de modelos que, de algum modo, pudessem ajudar a compreender melhor o problema, pelo menos em algumas das suas múltiplas componentes.

Esses modelos permitiram, para as diversas unidades territoriais consideradas, destacar as variáveis mais explicativas, cujo estudo comparativo, com base nas taxas de reprovação (insucesso), foi então sistematizado.

O estudo incidiu sobre um universo constituído pelos alunos do continente que, no ano lectivo de 1988/89, frequentaram o sexto ano do segundo ciclo do ensino básico e que não abandonaram o sistema.

Utilizaram-se como fonte de informação primária os boletins estatísticos de matrícula, preenchidos no acto de inscrição e posteriormente tratados pelo GEP do Ministério da Educação que disponibilizou estes dados.

Foram também pesquisadas e utilizadas fontes secundárias de informação (estatísticas gerais) de modo a enriquecer o estudo, permitindo definir outras variáveis explicativas. Assim, foram introduzidas variáveis relacionadas com o rendimento médio dos agregados familiares e com a taxa de professores sem habilitação própria, caracterizando eventuais assimetrias regionais ou locais, embora a capacidade explicativa destas variáveis não se tenha mostrado particularmente elevada, provavelmente devido ao facto de a informação conseguida se encontrar bastante agregada.

Ficou de qualquer modo a convicção de que, mesmo com a obtenção de informação mais desagregada, não seria no campo das assimetrias regionais e locais que se encontrariam as melhores variáveis explicativas, como será referido ao longo do trabalho. No último ponto são feitas algumas sugestões com vista a tentar enriquecer a informação da fonte primária (fichas dos alunos).

O estudo foi desenvolvido em três fases: numa primeira fase foi feita a modelação a nível de distrito, deduzindo um modelo para cada um dos dezoito distritos do continente; numa segunda fase foi coberto o mesmo universo com um número mais reduzido de modelos (cinco), trabalhando a nível de nuts II (Norte, Centro, Lisboa e Vale do Tejo, Alentejo e Algarve); finalmente, numa terceira fase, foi deduzido um modelo único para todo o universo em estudo, introduzindo novas variáveis explicativas que pudessem compensar o natural empobrecimento resultante da agregação.

A metodologia de abordagem utilizada - regressão logística - que é descrita e justificada no ponto seguinte parece conferir a este trabalho um carácter pioneiro, já que não se encontraram outros trabalhos sobre o tema do insucesso escolar que utilizassem esta metodologia. Um outro aspecto característico deste trabalho - e que decorre da opção pela regressão logística - é o de se ter trabalhado ao nível do aluno; em alguns dos trabalhos consultados, e em relação aos quais foi possível por vezes confrontar resultados, o estudo foi feito ao nível de região ou de escola, tratando portanto conjuntos de alunos.

Os trabalhos encontrados sobre o insucesso escolar, tratando este tema sob perspectivas diferentes e/ou utilizando outras metodologias, podem ser distribuídos por três grupos:

- Tratamento quantitativo de dados, de carácter descritivo e sem recurso a modelos. Por exemplo em [7] são tratadas várias questões relacionadas com o insucesso escolar, nomeadamente taxas de escolarização, taxas de reprovação e peso da repetência (reflexo do insucesso no funcionamento do sistema).
- Trabalhos que encaram o insucesso escolar de um ponto de vista menos quantitativo, focando sobretudo aspectos sociológicos e/ou psicológicos. São exemplos [2] e [5], onde se abordam, entre outras, questões relacionadas com as origens socio-familiares



do insucesso (situação socio-económica, efeito da linguagem e as origens estruturais e funcionais do insucesso).

- Modelação de sistemas educativos numa perspectiva global, onde o insucesso aparece apenas como uma das suas múltiplas componentes. Em [9] são tratadas diversas questões relacionadas com o tema do insucesso escolar, como, por exemplo, a relação entre resultados escolares e nível socio-económico do pai e entre taxa de retenção e nível socio-económico do encarregado de educação numa perspectiva de modelos de regressão múltipla ou ainda a estimação da probabilidade de transição de ano recorrendo às cadeias de Markov.

## 2. Variáveis utilizadas

A informação contida nos boletins estatísticos de matrícula preenchidos pelos alunos permitiu definir um conjunto de variáveis explicativas binárias que constituiu a base de todo o processo de modelação do insucesso escolar, adiante desenvolvido.

Assim, foram definidas as variáveis binárias  $s_1, s_2, \dots, s_{13}$  respeitantes à situação socio-económica do encarregado de educação. Em anexo são indicadas as categorias socio-económicas correspondentes a cada variável. Uma das variáveis da situação socio-económica ( $s_3$ ) foi, logo de início, excluída do modelo, dado que, para esse conjunto de variáveis

$$s_k = 1 - \sum_{j \neq k} s_j$$

ou seja, qualquer uma delas é linearmente dependente das  $n - 1$  restantes.

A escolha de  $s_3$  assenta em duas razões:

- A taxa de reprovação para esta variável é aproximadamente igual à taxa média para o total de observações, o que conduz a uma mais fácil interpretação em face do tipo de sinal (+/-) dos parâmetros estimados.
- As frequências absolutas são relativamente baixas, deixando assim fora do modelo um número não significativo de observações.

Em termos meramente interpretativos era preferível excluir a variável  $s_{12}$ , dado que corresponde aos alunos cujos pais não se inserem em nenhuma das categorias propostas no boletim estatístico. Mas o elevado número de observações abrangidas faria baixar bastante o nível de concordância do modelo. De qualquer modo foi feito um estudo paralelo para esse caso, embora sem resultados relevantes que justificassem a sua inclusão neste trabalho.

Também as variáveis *id*(ade), *sex*(o), *mp* (modalidade de ensino particular), *rn* (regime nocturno) e *nc* (nacionalidade de outros países da CE) se basearam na informação dos boletins estatísticos de matrícula. Esta última variável isola os alunos nacionais de outros países da CE, identificando nomeadamente os filhos dos emigrantes entretanto regressados.

A partir de outras fontes de informação foram definidas variáveis relativas ao rendimento médio (*rm*), à taxa de professores sem habilitação própria e à localização. A variável dependente

aprov(eitamento) toma o valor 1 no caso em que o aluno teve aproveitamento e o valor 0 se o aluno desistiu ou foi reprovado.

Em anexo são definidas de um modo mais detalhado todas as variáveis utilizadas.

### 3. A regressão logística

#### 3.1 Modelos de escolha binária

Quando a variável dependente não é contínua, estando associada a duas ou mais escolhas qualitativas, o modelo geral de regressão múltipla é inadequado. É o que acontece neste estudo do insucesso escolar em que a variável a explicar é, por natureza, uma variável dicotómica (aproveitamento/não aproveitamento).

Os modelos de escolha binária pressupõem a existência dessa dicotomia e admitem, tomando como exemplo o caso em estudo, que a probabilidade de um aluno não ter aproveitamento depende de um conjunto de atributos inerentes a esse aluno (observação).

A regressão logística tem sido aplicada com sucesso noutras áreas, na obtenção de modelos em que a variável dependente tem - tal como no caso em estudo - natureza dicotómica. Na referência [8] são citados vários estudos da área da medicina (por exemplo a relação entre a probabilidade de remissão do cancro e as características do doente) e em [6] são apresentados modelos na área da educação (pretendendo-se, por exemplo, estimar a probabilidade de um aluno optar por residir no colégio universitário com base em informação acerca de atributos individuais e atributos do colégio ) utilizando a regressão logística.

##### 3.1.1 Modelo de probabilidade linear

Aplicado ao caso em estudo, este modelo tem a forma

$$P_i = P(Y_i = 0) = \alpha + \beta X_i$$

onde  $X_i$  é o valor do atributo (por exemplo a idade do aluno) e  $Y_i$  uma variável binária com valor 0 se o aluno não teve aproveitamento.

O inconveniente deste modelo reside no facto de existir a possibilidade de prever que um aluno não tem aproveitamento com uma probabilidade igual a 1 ou 0 quando é perfeitamente possível que isso não aconteça.

##### 3.1.2 Modelo probit

Uma transformação para resolver as dificuldades do modelo de probabilidade linear baseia-se na função de probabilidade cumulativa normal

$$P_i = F(\alpha + \beta X_i) = F(Z_i)$$

sendo  $F$  a função de probabilidade cumulativa.

A análise probit permite obter estimativas para os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ .

Então, considerando um valor crítico  $Z_i^*$ , pode dizer-se que um aluno

$$\begin{array}{ll} \text{não tem aproveitamento} & \text{se } Z_i \geq Z_i^* \\ \text{tem aproveitamento} & \text{se } Z_i < Z_i^* \end{array}$$

O modelo probit admite que  $Z_i^*$  é uma variável aleatória normal, de modo que

$$P[Z_i^* \leq Z_i]$$

pode ser calculada a partir da função de probabilidade cumulativa normal (ver [6], por exemplo).

A probabilidade  $P_i$  neste modelo pode interpretar-se como uma estimativa da probabilidade de um aluno não ter aproveitamento sabendo que a idade tem o valor  $X_i$ .

### 3.1.3 Modelo logit

Este modelo baseia-se na função de probabilidade logística cumulativa

$$P_i = F(\alpha + \beta X_i) = 1 / (1 + e^{-(\alpha + \beta X_i)})$$

com média = 0 e variância =  $\pi^2/3$

Para o caso em estudo e partindo da relação anterior pode obter-se

$$\text{logit}(p) = \log_e [p/(1-p)] = \alpha + \beta X$$

onde  $p$  é a probabilidade de um aluno não ter aproveitamento.

É possível provar que existe sempre um máximo único para o modelo logit, pelo que a estimação de máxima verosimilhança é particularmente adequada.

Dado que as funções cumulativas normal e logística são semelhantes mas o modelo logit é mais fácil de usar, de um ponto de vista computacional, a escolha recaiu sobre o modelo logit. Detalhes sobre este modelo podem ser consultados em [1] ou [3], por exemplo.

O pacote estatístico SAS (Statistical Analysis System), disponibilizado pelo GEP/ME, foi o principal suporte computacional utilizado para a obtenção de modelos lineares de regressão logística, através da opção *stepwise* (passo a passo).

Para além da regressão logística atrás descrita foi também realizada uma análise de componentes principais no sentido de reduzir o número de variáveis e eliminar informação redundante. No entanto, os resultados não foram satisfatórios, quer do ponto de vista do número mínimo de componentes principais necessário para um nível de explicação aceitável, quer no referente à composição dessas componentes principais em termos interpretativos.

### 3.2 Interpretação de resultados

Nos modelos obtidos aparecem parâmetros estimados com sinal (-) e outros com sinal (+). Também se verificam grandes variações entre valores absolutos dos coeficientes das variáveis escolhidas para integrarem o modelo final.

De um ponto de vista interpretativo, o sinal (-) tem a ver com uma diminuição da probabilidade  $p$  de um aluno não ter aproveitamento e o sinal (+) com um aumento dessa probabilidade.

Seguindo o mesmo raciocínio, quanto maior for o valor absoluto do coeficiente mais significativa é a variável correspondente, isto é, maior é a alteração, na probabilidade  $p$  de um aluno ter insucesso, que a sua entrada no modelo provoca. Então, quanto maior for o valor do

coeficiente, maior discrepância existe entre os valores 1 e 0 da variável correspondente, em termos de taxa de reprovação.

Outro indicador a ter em conta na interpretação de resultados é o acréscimo no nível de concordância, entre probabilidades previstas e respostas observadas, provocado pela entrada de cada variável no modelo. Neste caso, para além do valor do parâmetro estimado, entra em jogo também o peso da variável, isto é, o número de alunos aos quais corresponde o valor 1 da variável.

#### 4. Modelos por distritos

##### 4.1 Modelos

Embora numa fase inicial do estudo tenham sido consideradas unidades de nível mais baixo (concelho e nuts III), o distrito foi a menor unidade a receber um tratamento sistemático de modelação.

Os modelos deduzidos, trabalhando no modo passo a passo, são aqui apresentados sob duas perspectivas:

- i) Pela ordem de entrada das variáveis no modelo, o que permite uma visualização global das variáveis mais explicativas. Os resultados segundo esta perspectiva são apresentados no quadro 1, onde, para além do parâmetro estimado para cada uma das variáveis é indicado também o nível de concordância entre probabilidades previstas e respostas observadas no modelo final.
- ii) Por uma ordem pré-estabelecida das variáveis explicativas, de modo a permitir uma mais fácil leitura comparativa para todos os distritos. O quadro 2 mostra esta perspectiva, indicando-se apenas o sinal (+/-) do parâmetro estimado para as variáveis que integram o modelo.

Os aspectos mais relevantes dos quadros atrás referidos, tendo em conta o comportamento de cada uma das variáveis, são discutidos mais adiante, mas alguns comentários de ordem mais geral podem desde já ser adiantados.

O nível de concordância entre as probabilidades previstas pelos modelos e as respostas observadas (sucesso/insucesso) parece aceitável para este tipo de análise, sobretudo se se atender à escassez de informação, como é referido no último ponto.

Não havia interesse em forçar mais variáveis a entrar no modelo, aumentando por exemplo o nível de significância imposto (5%), pois as últimas variáveis a entrar no modelo já dão pouca contribuição para o nível de concordância anteriormente referido.

Com excepção da variável **cd**, o comportamento das variáveis explicativas no modelo apresenta uma regularidade digna de realce. Veja-se por exemplo, no quadro 2, a constância do sinal (+/-) do coeficiente estimado para cada variável, ao longo dos dezoito distritos do continente.

Quadro 1 Modelos a nível de distrito por ordem de entrada das variáveis e níveis de concordância

passo	AVEIRO		BEJA		BRAGA		BRAGANÇA		C. BRANCO		COIMBRA		ÉVORA		FARO		GUARDA	
	var	parâm	var	parâm	var	parâm	var	parâm	var	parâm	var	parâm	var	parâm	var	parâm	var	parâm
0	interc	-2,016	interc	-1,492	interc	-1,645	interc	-1,608	interc	-1,379	interc	-1,952	interc	-1,854	interc	-1,963	interc	-2,160
1	id	-0,655	id	-0,863	id	-1,010	sex	-1,069	id	-0,905	id	-0,890	id	-0,902	s12	0,739	id	-0,834
2	s9	1,066	sex	-0,826	s9	0,958	id	-0,896	sex	-0,794	s12	0,893	sex	-0,719	id	-0,760	mp	-1,261
3	s12	0,845	s2	1,127	sex	-0,514	s2	1,741	s9	0,659	s9	0,759	s12	0,982	sex	-0,663	s13	-1,874
4	s2	2,358	cd	-0,870	s2	1,401	cd	-0,716	cd	0,708	s2	1,509	s9	0,854	s13	-2,371	s2	1,443
5	sex	-0,461	s13	-0,717	nc	-1,586	mp	-2,797	s2	0,901	sex	-0,364	s11	1,139	s9	-0,834	s10	0,627
6	nc	-1,035	mp	-1,150	s12	0,537	nc	-1,177	s10	-1,465	s5	0,513	s2	0,794	nc	-1,409	s12	0,627
7	mp	-0,556	s12	0,562	s1	0,577	s7	0,887	s6	-0,779	nc	-0,689	cd	0,347	s1	0,696	cd	0,481
8	s13	-0,718	s9	0,781	mp	-0,396	s12	0,806	nc	-0,689	s1	0,806	s7	0,887	s10	-2,194	s1	0,670
9	cd	0,347	s9	0,781	mp	-0,396	s12	0,806	nc	-0,689	s1	0,806	s7	0,887	mp	0,649	nc	-0,861
10	s6	-0,646	s9	0,781	mp	-0,396	s12	0,806	nc	-0,689	s1	0,806	s7	0,887	mp	0,649	nc	-0,861
11	s1	0,392	s9	0,781	mp	-0,396	s12	0,806	nc	-0,689	s1	0,806	s7	0,887	mp	0,649	nc	-0,861
12	s1	0,392	s9	0,781	mp	-0,396	s12	0,806	nc	-0,689	s1	0,806	s7	0,887	mp	0,649	nc	-0,861
Concord	68,5 %		72,7 %		67,9 %		73,5 %		67,2 %		63,1 %		69,2 %		69,6 %		68,2 %	
Discord	27,4 %		22,4 %		26,2 %		22,8 %		25,0 %		26,9 %		27,1 %		24,4 %		25,5 %	
Empat	4,1 %		4,9 %		5,8 %		3,7 %		7,9 %		10,0 %		3,7 %		5,9 %		6,3 %	

passo	LEIRIA		LISEOA		PORTALEG		PORTO		SANTARÉM		SETÚBAL		V. CASTELO		V. REAL		VISEU	
	var	parâm	var	parâm	var	parâm	var	parâm	var	parâm	var	parâm	var	parâm	var	parâm	var	parâm
0	interc	-1,598	interc	-1,696	interc	-1,076	interc	-1,762	interc	-1,703	interc	-1,411	interc	-2,757	interc	-1,600	interc	-1,867
1	id	-0,771	id	-0,807	id	-0,889	id	-0,853	id	-0,826	id	-0,710	id	-1,193	id	-0,840	id	-1,042
2	sex	-0,657	sex	-0,506	cd	-0,951	s12	0,626	s2	1,418	s13	-1,121	s9	1,295	cd	-1,019	s12	0,944
3	s9	0,889	mp	-0,627	sex	-0,602	s9	0,644	sex	-0,571	sex	-0,424	mp	-1,724	s13	-1,300	s2	1,028
4	s12	0,707	s12	0,444	s13	-1,790	sex	-0,383	s12	0,625	s2	1,121	cd	0,741	s12	0,590	sex	-0,415
5	mp	-1,086	s9	0,570	mp	-1,289	nc	-1,081	s9	0,519	s10	-1,393	s12	0,906	s2	0,852	nc	-1,118
6	nc	-1,431	s13	-0,650	mp	-1,289	s6	-0,613	s1	0,580	s7	-0,455	s1	1,045	nc	-1,018	mp	-1,227
7	s10	-0,818	s6	-0,475	s13	-0,506	s13	-0,506	s13	-0,840	cd	-0,409	nc	-0,942	sex	-0,379	s5	0,444
8	s2	0,807	nc	-0,996	s2	1,018	s2	1,018	s6	-1,050	s6	-0,551	s4	0,715	sex	-0,379	s5	0,444
9	s8	0,712	cd	0,149	s1	0,450	s1	0,450	nc	-1,235	nc	-1,104						
10									mp	-0,460								
11																		
12																		
Concord	68,4 %		67,2 %		64,7 %		64,4 %		67,6 %		62,5 %		72,1 %		68,0 %		66,7 %	
Discord	25,8 %		29,9 %		21,9 %		28,8 %		26,9 %		28,4 %		23,5 %		25,1 %		24,9 %	
Empat	5,8 %		2,9 %		13,4 %		6,7 %		5,5 %		9,1 %		4,4 %		6,9 %		8,3 %	

#### 4.2 Interpretação de resultados

- Um exame dos modelos obtidos mostra claramente o lugar de destaque assumido pela variável *id(ade)* em todo o processo. Em dezasseis dos dezoito distritos ela é escolhida em primeiro lugar para integrar o modelo. E nos dois distritos em que isso não acontece (Bragança e Faro) a sua entrada verifica-se logo no passo seguinte.

Outro aspecto importante a assinalar em relação à variável *id* é o de o parâmetro estimado ser sempre negativo, o que significa que a entrada da variável no modelo faz baixar a probabilidade *p* de um aluno ser reprovado. Isto tem a ver forçosamente com taxas de reprovação mais elevadas para as observações (alunos) em que *id=0*, isto é, em que os alunos têm idades que ultrapassam o limite próprio para a frequência do 6º ano de escolaridade. A figura 1 evidencia este aspecto, colocando em confronto as taxas de reprovação dos alunos em idade própria para a frequência do 6º ano de escolaridade (até doze anos) e os alunos com idades acima desse limite.

Quadro 2 - Modelos a nível de distrito: variáveis explicativas e sinal do parâmetro

	id	sex	s1	s2	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10	s11	s12	s13	nc	mp	cd
1 AVEIRO	-	-	+	+						+			+	-	-	-	+
2 BEJA	-	-		+						+			+	-	-	-	-
3 BRAGA	-	-	+	+						+			+	-	-	-	-
4 BRAGANÇA	-	-	+	+						+			+	-	-	-	-
5 C.BRANCO	-	-		+			-			+	-			-	-	-	+
6 COIMBRA	-	-		+		+				+			+	-	-	-	-
7 ÉVORA	-	-		+						+		+	+	-	-	-	+
8 FARO	-	-	+	+						+	-		+	-	-	+	-
9 GUARDA	-	-	+	+						+			+	-	-	-	+
10 LEBRIA	-	-		+					+	+	-		+	-	-	-	-
11 LISBOA	-	-	+	+		+	-			+	-		+	-	-	-	+
12 PORTALEGRE	-	-		+						+			+	-	-	-	-
13 PORTO	-	-	+	+						+			+	-	-	-	-
14 SANTARÉM	-	-	+	+						+			+	-	-	-	-
15 SETÚBAL	-	-		+						+	-		+	-	-	-	-
16 V.CASTELO	-	-	+	+		+				+			+	-	-	-	+
17 V.REAL	-	-		+						+			+	-	-	-	-
18 VISEU	-	-		+		+				+			+	-	-	-	-

(A ausência de sinal significa que a variável não entrou no modelo)

- Também a variável *sex* apresenta um comportamento análogo em alguns aspectos:
  - i) Uma presença forte em quase todos os modelos. Note-se a acentuada subida do nível de concordância após a sua entrada no modelo.
  - ii) Parâmetros estimados sempre negativos, o que significa que a taxa de reprovação dos alunos do sexo feminino (*sex=1*) é inferior à dos alunos do sexo masculino. Este resultado é ilustrado graficamente na figura 2.

- As variáveis **mp** (modalidade particular ou cooperativa) e **nc** (nacionalidade de outros países da CE) apresentam também uma clara dicotomia entre as observações para as quais a variável tem valor 1 e aquelas a que corresponde o valor 0.

No caso da variável **mp** existem apenas dois distritos (Faro e V. Real) onde a taxa de reprovação dos alunos da modalidade oficial (**mp=0**) é inferior à da modalidade particular.

- Em relação à variável **nc** apenas Beja é excepção, apresentando uma taxa mais elevada para os alunos com nacionalidade de outros países da CE (**nc=1**).

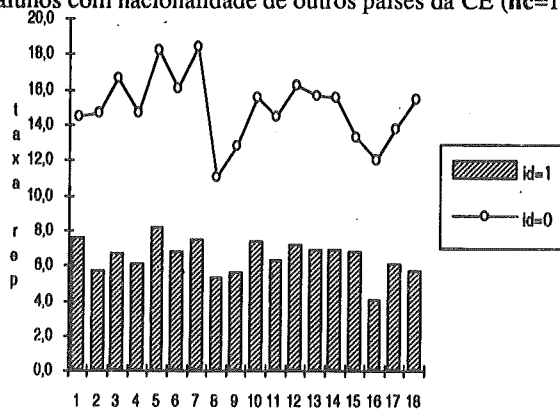


Fig 1 - Variável **id** ( $id = 1 \Leftrightarrow idade \leq 12$  anos)

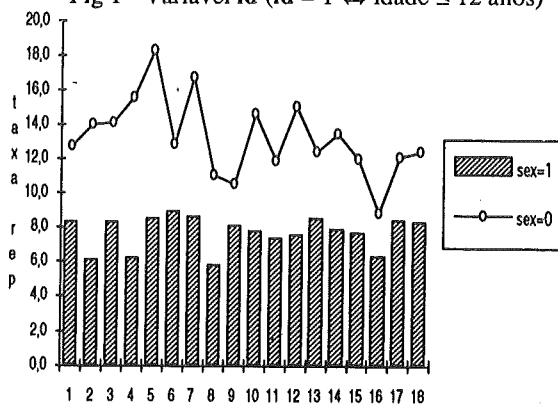


Fig 2 - Variável **sex** ( $sex = 1 \Leftrightarrow$  sexo feminino)

Mesmo nesse caso, a proximidade entre os dois valores (**nc=1** e **nc=0**) explica o não aparecimento da variável no modelo.

- Como foi referido, a variável **cd** (capitais de distrito) teve um comportamento bastante irregular, tendo-se verificado que para um terço do total de distritos a taxa de reprovação dos alunos que se matricularam em escolas situadas no concelho que engloba a capital de distrito é superior à dos restantes alunos. A alternância de sinal dos coeficientes (quadro 2) reflecte esta irregularidade de comportamento.

- Em relação às variáveis  $s_j$  da situação socio-económica do encarregado de educação, foi possível extrair algumas considerações interessantes:
  - A variável  $s_2$  correspondente aos filhos de agricultores que trabalham por conta de outrem tem uma presença quase constante nos modelos (só não aparece em quatro distritos) e sempre de um modo acentuadamente desfavorável (coeficientes positivos e de valor elevado).
  - O mesmo sucede com a variável  $s_9$  (operários qualificados e semi-qualificados) e  $s_{12}$  (pessoas activas que não se enquadram em nenhuma das classes propostas) embora com parâmetros estimados de valor mais reduzido.
  - A variável  $s_{13}$  (desempregados) apresenta coeficientes sempre negativos e de valor elevado. Este resultado é consequência dos valores extremamente baixos encontrados para as taxas de reprovação dos alunos cujos pais se encontram nesta situação, o que sugere que esta disponibilidade forçada para acompanhar mais de perto as actividades dos filhos tem pelo menos este aspecto positivo.
- Finalmente, em relação às variáveis  $s_9$  (filhos de operários qualificados e semi-qualificados) e  $s_{10}$  (filhos de operários não qualificados), constatou-se que, com excepção de Viseu, as taxas de reprovação para  $s_{10}$  estão sempre claramente abaixo de  $s_9$ .

## 5. Um modelo para o continente

### 5.1 Introdução

Não se apresentam neste trabalho os modelos (cinco) obtidos para as nuts II, por limitações de espaço e por não se terem encontrado alterações significativas em relação aos resultados obtidos para os distritos, tanto no que diz respeito aos níveis de concordância entre probabilidades previstas e respostas observadas, como no que se refere às variáveis seleccionadas e aos valores dos respectivos coeficientes estimados. Esses resultados são apresentados em [10].

A tentativa de obter um modelo único para todo o universo (continente) utilizando apenas as variáveis usadas a nível de distrito e de nuts II conduziu forçosamente a um modelo com capacidade explicativa menor do que os anteriores. Para o melhorar foram introduzidas novas variáveis que não tinha sido possível utilizar para unidades geográficas menores (e portanto com populações mais reduzidas). Assim, foram utilizadas as variáveis **rn** (regime nocturno) e **rm** (rendimento médio), definidas em anexo, bem como algumas outras variáveis de localização e uma variável relativa à taxa de professores sem habilitação própria que acabaram por não ser seleccionadas para integrarem o modelo final.



## 5.2 Modelo

Nos diversos ensaios realizados na procura do "melhor" modelo explicativo a nível do continente nem todas as variáveis explicativas tiveram igual tratamento. As variáveis  $s_j$  (situação socio-económica) e as variáveis  $id$ ,  $sex$ ,  $nc$ ,  $mp$  e  $rn$  formaram um núcleo quase sempre presente em todos os ensaios de modelação. Cada um dos três grupos de variáveis de localização foi sempre considerado com exclusão dos outros dois, dada a sua forte dependência.

O modelo aqui apresentado (ver Quadro 3) não é, de um ponto de vista puramente matemático, o melhor dos vários modelos encontrados, mas pareceu ser, de um ponto de vista interpretativo, o que melhor correspondia ao objectivo proposto.

Quadro 3 - Construção do modelo para o continente

Passo	Variável	Parâmetro estimado	Erro padrão	Score Qui-quad	Prob > Qui-quad	Score var. expl	Concord %	Qui-quad residual
0	interc	-1,521	0,038					3946,9
1	id	-0,817	0,023	1696,7	0,0001	1696,7	37,2	2213,0
2	sex	-0,494	0,023	467,2	0,0001	2155,0	51,9	1758,6
3	s9	0,520	0,040	361,1	0,0001	2514,9	56,2	1465,6
4	s12	0,408	0,037	583,9	0,0001	3052,0	61,5	957,7
5	s2	0,857	0,073	283,2	0,0001	3292,3	62,4	685,9
6	nc	-1,064	0,087	157,6	0,0001	3464,0	63,2	531,7
7	s13	-0,849	0,066	122,7	0,0001	3567,8	64,1	397,6
8	mp	-0,470	0,046	120,7	0,0001	3672,9	64,8	276,0
9	rn	1,551	0,161	106,7	0,0001	3821,0	65,0	169,6
10	s6	-0,562	0,063	61,3	0,0001	3855,9	65,8	104,8
11	s10	-0,479	0,070	36,7	0,0001	3889,8	64,9	66,5
12	s7	-0,201	0,042	28,8	0,0001	3912,8	67,0	36,1
13	s4	-0,156	0,057	13,6	0,0002	3924,5	67,3	22,0
14	rm	-0,076	0,025	10,3	0,0013	3934,9	67,7	11,7
15	s1	0,136	0,057	5,8	0,0165	3940,6	68,0	6,1

Associação entre probabilidades previstas e respostas observadas, no modelo final:

Concordantes = 68,0%  
Discordantes = 29,9%  
Empatados = 2,1%

O quadro 3 mostra a construção desse modelo passo a passo, aparecendo as variáveis por ordem de entrada.

Novamente a variável  $id$  é a primeira a ser escolhida para entrar no modelo, com um elevado valor para o "score qui-quadrado", e as variáveis  $id$  e  $sex$  fazem, em conjunto, subir o valor do nível de concordância para 51,9%. Os coeficientes estimados para estas variáveis são negativos, como habitualmente, o que será analisado mais adiante conjuntamente com as outras variáveis seleccionadas para integrem o modelo.

O nível de concordância entre probabilidades previstas e respostas observadas no modelo final é de 68,0%, valor da mesma ordem de grandeza dos obtidos anteriormente para os distritos.

## 5.3 Interpretação de resultados

A figura 3 pretende dar uma panorâmica global do comportamento das variáveis incluídas no modelo.

As variáveis **id**, **sex**, **nc** e **mp** já foram analisadas com algum destaque no ponto 4.2, não havendo alterações a assinalar: Os alunos para os quais qualquer uma destas variáveis toma o valor 1, ou seja

**id** = 1 : idade  $\leq$  12 anos

**sex** = 1 : sexo feminino

**nc** = 1 : nacionalidade de outros países da CE

**mp** = 1 : ensino particular ou cooperativo

têm taxas de reprovação claramente abaixo dos valores atingidos pelos grupos correspondentes ao valor 0 da respectiva variável binária. Daí a sua presença no modelo sempre com sinal (-).

Em relação às variáveis  $s_j$ , representativas da situação socio-económica do encarregado de educação, também a confirmação de  $s_2$  (filhos de trabalhadores agrícolas por conta de outrem) como a pior de todo o leque e  $s_6$  (directores, quadros superiores,...) e  $s_{13}$  (desempregados) como as melhores.

Interessante parece ser o comportamento comparativo de  $s_9$  (filhos de operários qualificados e semi-qualificados) e  $s_{10}$  (operários não qualificados): para os primeiros a taxa de reprovação é de 15,5% (só suplantada por  $s_2$ ) enquanto que para os segundos apresenta um dos valores mais baixos de todo o leque (6,5%).

Ainda em relação às variáveis  $s_j$ , há a realçar a presença quase constante de  $s_{12}$  (pessoas activas não inseridas em nenhuma das categorias propostas) em todos os modelos deduzidos sempre com sinal (+) para o parâmetro estimado, consequência do elevado valor da taxa de reprovação para estes alunos. O número elevado de alunos nestas condições talvez justificasse a desagregação do campo do boletim estatístico correspondente a esta variável, para tentar perceber o fenómeno.

Ficaram fora do modelo as variáveis da situação socio-económica  $s_5$  (trabalhadores por conta própria, da indústria, construção civil, comércio e transportes),  $s_8$  (encarregados e capatazes dos trabalhadores manuais) e  $s_{11}$  (pessoal das forças armadas).

A variável **rn** (regime nocturno) é de longe a que mais se destaca pelo elevado valor da taxa de reprovação para os alunos que seguem este regime de ensino. Note-se que isso se reflecte no valor comparativamente elevado do seu parâmetro estimado (quadro 3). No entanto, o já referido número reduzido de alunos nesta situação aconselha alguma prudência nas ilações.

Finalmente, a variável **rm** (rendimento médio dos agregados), não desempenhou um papel muito importante no processo de modelação, o que pode ficar a dever-se ao facto de a informação estar bastante agregada (sublinhe-se que a variável indica apenas se a escola frequentada pelo aluno se situa em nuts II de elevado rendimento médio). Seria interessante que cada aluno indicasse o rendimento médio do agregado, aquando do preenchimento do boletim estatístico de matrícula.

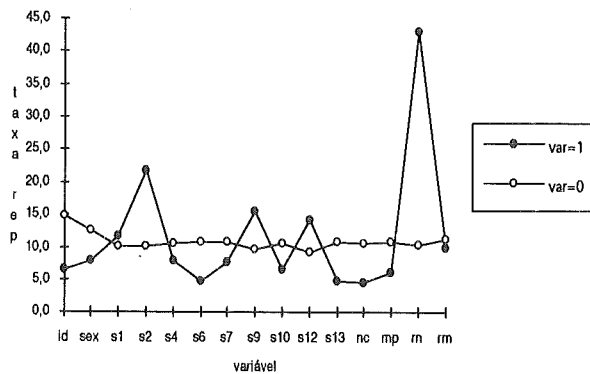


Fig.3 - Taxas de aprovação comparativas para as variáveis presentes no modelo (Continente)

## 6. Conclusões

O trabalho apresentado apresenta algumas limitações que resultam em boa parte de limitações dos dados de base:

- Pobreza dos dados dos boletins estatísticos de matrícula, o que já foi parcialmente corrigido nos boletins de anos subsequentes aos do estudo, com redefinição das categorias socio-profissionais e inclusão de informações sobre habilitações do pai e da mãe e número de irmãos. Afigura-se como potencialmente interessante poder dispor de dados sobre:
  - modo de acesso à escola e duração do percurso;
  - rendimento do agregado a que o aluno pertence;
  - número de alunos por turma;
  - experiência e qualificação profissional do professor.
- Dificuldade de obtenção de dados caracterizadores do ambiente social, económico e cultural da área em que a escola frequentada por cada aluno se insere. As estatísticas são muito limitadas e apresentam um nível de agregação manifestamente inadequado para este propósito. Restrições de tempo inibiram uma pesquisa mais aprofundada nesta direcção, e as tímidas tentativas ensaiadas (através da introdução de variáveis como *rm*, *cd* e algumas variáveis de localização) não resultaram relevantes, certamente porque o nível de agregação utilizado não permite discriminar situações de forma adequada.

Não foi possível neste trabalho tratar os casos de abandono do sistema de ensino (por total falta de dados) e também não foram consideradas, no processo de modelação apresentado, as observações (alunos) com valores desconhecidos de alguma variável, embora um estudo complementar tenha mostrado que os modelos para este universo alargado apresentavam níveis de concordância mais elevados, ultrapassando geralmente a barreira dos 80% para o nível de concordância entre as probabilidades previstas e as respostas observadas. Mas o facto de os valores desconhecidos aparecerem precisamente nas variáveis globalmente mais explicativas

(*id(ade)*, *sex(o)*) levaria a uma forte perda da capacidade interpretativa dos modelos, pelo que se optou por apresentar apenas o estudo referente à modelação do universo constituído pelas observações sem falhas de preenchimento. Verificou-se que as taxas de reprovação dos alunos que não preencheram totalmente o boletim estatístico de matrícula são muito mais elevadas do que as dos seus colegas mais cuidadosos, o que significa que os valores das taxas de reprovação aqui referidos estão abaixo dos valores reais.

Se, para algumas das variáveis explicativas consideradas, o comportamento depende da partição escolhida para o território do continente, outras há em que tal comportamento não oferece dúvidas em termos interpretativos globais.

Estão neste caso as variáveis *id* (idade própria) e *sex(o)* analisadas nos pontos 4 e 5.

Por um lado as taxas de reprovação dos alunos com idades superiores ao limite dos doze anos (*id* = 0) e dos alunos do sexo masculino (*sex* = 0) apresentam valores nitidamente acima dos dos seus colegas em idade própria para a frequência do 6º ano de escolaridade (*id* = 1) e do sexo feminino (*sex* = 1), respectivamente.

Por outro lado o peso desses alunos no sistema é particularmente elevado, constituindo aproximadamente metade da população total, o que justifica o destaque dado a estas variáveis em termos de modelação, preterindo por vezes variáveis explicativas com taxas de reprovação mais diferenciadas.

Está fora do âmbito deste trabalho procurar causas mais profundas para o comportamento destas duas variáveis, mas uma comparação simples entre a percentagem de alunos com idades superiores a doze anos (*id* = 0) e a percentagem de alunos com insucesso no 6º ano de escolaridade, indica claramente que, pelo menos no caso da idade, o problema deve ser atacado a montante.

Também para os alunos do ensino particular ou cooperativo (*mp* = 1) e para os nacionais de outros países da CE (*nc* = 1), as taxas de reprovação são bastante mais baixas do que as que se verificam para os respectivos conjuntos complementares. O mesmo se passa com os alunos do regime nocturno, cujas taxas de reprovação atingem valores excepcionalmente elevados. É de salientar no entanto que estas variáveis têm pesos muito menores do que as anteriormente referidas.

Finalmente, em relação à situação socio-económica, merecem destaque por estarem ligadas de forma marcante ao insucesso escolar as variáveis *s*<sub>9</sub> (filhos de operários qualificados ou semi-qualificados) e *s*<sub>2</sub> (filhos de trabalhadores agrícolas). *s*<sub>9</sub> é das primeiras variáveis a entrar nos modelos dos distritos (mais industrializados) do litoral, enquanto que *s*<sub>2</sub> ocupa lugares de destaque nos distritos do interior, correspondendo-lhe a maior taxa de reprovação. Merece ainda referência a variável *s*<sub>12</sub> (filhos de activos não classificados nas outras categorias) que aparece (contribuindo para o insucesso) nos primeiros lugares dos modelos de vários distritos (e do continente), sendo até a primeira a entrar no distrito de Faro.

Com tendência inversa, isto é, positivamente correlacionada com o aproveitamento, é de destacar, até pelo carácter inesperado e surpreendente dos resultados sistematicamente obtidos para os diferentes distritos, a variável  $s_{13}$  (filhos de desempregados), à qual corresponde (juntamente com  $s_6$ ) a menor de todas as taxas de reprovação para as situações socio-económicas consideradas.

### Referências

- [1] Cox, D.R. and Snell, E.J. (1989), *The Analysis of Binary Data*, London: Chapman and Hall, Ltd.
- [2] Gall, A.L. (1978), *O insucesso escolar: diagnóstico e recuperação*, Lisboa: ed. Estampa.
- [3] Harrel, F.E. (1986), *The Logistic Procedure*, SAS Institute Inc..
- [4] Hosmer, D.W., Jr. and Lemeshow, S. (1989), *Applied Logistic Regression*, New York: John Wiley & Sons.
- [5] Marchand, F. (1986), *Échec scolaire: le point de vue d'un psychologue*, Cahiers pédagogiques, nº 242-243, Mars-Avril.
- [6] Pindick, R.S. and Rubinfeld, L. (1981), *Econometric Models and Economic Forecasts*, McGraw-Hill.
- [7] GEP (1990), *Ministério da Educação, Imagens Estatísticas do Sistema Educativo: Alunos*, Lisboa: GEP-ME.
- [8] SAS Institute Inc. (1989), *SAS/STAT User's Guide, Versão 6-4ª ed (vols.1 e 2)* Cary, NC: SAS Institute Inc..
- [9] Tavares, L.V. (1991), *Desenvolvimento dos Sistemas Educativos: Modelos e perspectivas*, Ministério da Educação - Gabinete de Estudos e Planeamento, Lisboa: GEP-ME.
- [10] Vilaça, A.S. (1992), *Um modelo explicativo do insucesso escolar*, Tese de Mestrado - IST.

## Anexo

### Definição de variáveis

aprov = 1	se aluno obteve aproveitamento
cd = 1	se escola localizada em capital de distrito
id = 1	se idade do aluno $\leq 12$ anos
mp = 1	se modalidade de ensino particular ou cooperativa
nc = 1	se aluno tem nacionalidade CE excepto portuguesa
rm = 1	se escola em nuts II de elevado rendimento médio
rn = 1	se aluno frequenta regime nocturno
sex = 1	se aluno é do sexo feminino
s <sub>1</sub> = 1	se aluno filho de patrão agrícola ou agricultor por conta própria
s <sub>2</sub> = 1	se aluno filho de trabalhador agrícola por conta de outrem
s <sub>3</sub> = 1	se aluno filho de patrão ou trabalhador por conta própria das profissões liberais ou relacionadas
s <sub>4</sub> = 1	se aluno filho de patrão da indústria, construção civil, comércio, transportes ou serviços
s <sub>5</sub> = 1	se aluno filho de trabalhador por conta própria da indústria, construção civil, comércio, transportes ou serviços
s <sub>6</sub> = 1	se aluno filho de director, membro de corpo legislativo, quadro superior dirigente da administração pública e privada ou empregado com profissão liberal ou relacionada (incluem-se aqui os quadros técnicos, científicos, de ensino e similares)
s <sub>7</sub> = 1	se aluno filho de pessoal de enquadramento ou outros trabalhadores do comércio, serviços e administração pública
s <sub>8</sub> = 1	se aluno filho de encarregado ou capataz (empregado) de trabalhadores manuais
s <sub>9</sub> = 1	se aluno filho de operário qualificado ou semi-qualificado
s <sub>10</sub> = 1	se aluno filho de operário não qualificado
s <sub>11</sub> = 1	se aluno filho de pessoal das forças armadas (de carreira e serviço militar obrigatório)
s <sub>12</sub> = 1	se aluno filho de pessoa activa não classificada anteriormente
s <sub>13</sub> = 1	se aluno filho de desempregado
d <sub>i</sub> = 1 (i = 1, ..., 18)	se escola localizada no distrito i
n <sub>i</sub> = 1 (i = 1, ..., 5)	se escola localizada na nut II i
z <sub>i</sub> = 1 (i = 1, ..., 4)	se escola localizada na zona i (i = 1 - Interior Norte; i = 2 - Interior Centro; i = 3 - Alentejo Interior; i = 4 - Litoral)
hp	taxa de professores sem habilitação própria (para o distrito em que se localiza a escola)

# SISTEMA DE APOIO À GERAÇÃO DE ESCALAS DE PESSOAL NO PLANEAMENTO OPERACIONAL DE SISTEMAS DE TRANSPORTES COLECTIVOS

José Luís Borges

João Falcão e Cunha

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP  
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial - DEMEGI  
Secção de Gestão e Engenharia Industrial - GEIN  
Rua dos Bragas, 4099 Porto CODEX, Portugal

## Abstract

This work describes a decision support system for crew rostering for urban transport companies (SAGE). A general overview of the global problem of operational planning is provided, with a special emphasis on the crew rostering process and its interactions with the other processes of vehicle and crew scheduling. A detailed description of crew rostering in the company 'Serviço de Transportes Colectivos do Porto' (STCP) is provided and then used as supporting example for the presentation of SAGE.

In STCP the process of crew rostering directly interacts with two other processes and company functions: human resources management and services planning (crew scheduling). This fact demands that SAGE will provide tools allowing communication with the systems that support those processes. It is therefore very important to define: (i) a basic structure of information with all the entities involved in SAGE and in the communicating processes; (ii) the functions required for basic information and rule management, for supporting initial roster construction and for validation of tentative solutions, according to company rules; and (iii) intuitive user interfaces, as similar as possible, in a first step, to paper forms.

## Resumo

A automatização do processo de geração dos horários ou escalas do pessoal tripulante, ou *escalamento*, numa empresa de transportes colectivos de média ou grande dimensão é normalmente conseguida apenas parcialmente. Devido à variabilidade da informação sobre o pessoal, à pouca clara definição das regras do processo, à intervenção de vários departamentos da empresa e simultaneamente ao grande volume de informação manipulada, justifica-se a opção por sistemas de apoio à decisão.

Neste trabalho, que documenta a definição de um sistema de apoio ao escalamento e que utiliza como exemplo a empresa SCTP\* (Serviço de Transportes Colectivos do Porto), o processo de escalamento interaccua com dois outros processos: a gestão do pessoal tripulante e o planeamento operacional de serviços. Para conseguir obter uma cooperação efectiva entre os processos é necessário efectuar uma especificação cuidada das interfaces de comunicação e dos processos de comunicação.

Torna-se assim fundamental definir uma base de informação facilmente compatibilizável com a existente na empresa e que caracterize: os motoristas envolvidos; os serviços a afectar aos mesmos; o conjunto de procedimentos passíveis de serem facilmente automatizados (por exemplo as interacções no âmbito de protocolos com outros sistemas da empresa e as rotações dos motoristas); o conjunto de ferramentas que permitam validar as regras mais importantes e estáveis definidas pela empresa que venha a utilizar o sistema (por exemplo as regras sobre pedidos efectuados pelos motoristas ou as regalias adquiridas).

Finalmente, a interface com o utilizador do sistema de escalamento deve ser de uso fácil e configurável, oferecendo inicialmente um ambiente semelhante ao que é utilizado com documentos em papel.

## Keywords

Crew Rostering, Scheduling, Urban Transport Services, Decision Support System.

\* Todas as descrições de processos ou interacções utilizados pelo STCP são da inteira responsabilidade dos autores.

## **1. Planeamento Operacional e Escalamento**

### **1.1 Contexto do escalamento no planeamento operacional de transportes**

O Planeamento Operacional de Sistemas de Transportes Colectivos é uma tarefa complexa. Esta complexidade justifica-se devido ao grande volume de informação envolvido no processo e por se tratar de um problema de decisão com objectivos múltiplos. Numa empresa de transportes, o sucesso das decisões mede-se tendo em conta o balanço entre a qualidade do serviço oferecido à população e a utilização dos recursos disponíveis. A qualidade do serviço prestado pode ser medida através da quantidade de linhas alternativas, da frequência das viagens oferecidas, do cumprimento dos horários estabelecidos e pelo tipo de veículos utilizados. Os recursos mais dispendiosos de uma empresa de transportes são os veículos de transporte e o pessoal tripulante, que por consequência exigem uma gestão mais cuidada. Se por um lado há que tentar satisfazer o público utilizando o menor número de veículos e de pessoal possível, por outro torna-se necessário criar planos de trabalho equilibrados, do agrado do pessoal tripulante e de acordo com a legislação relativa a aspectos de segurança.

A complexidade do processo justifica que, na prática, este seja decomposto em subproblemas de menor dimensão por forma a possibilitar uma abordagem faseada. De um modo geral estes problemas não são completamente separáveis e, embora havendo a preocupação de estabelecer fronteiras por forma a minimizar as interacções entre eles, não é possível anulá-las por completo. Assim, as fases que correspondem à abordagem dos diferentes problemas não apresentam uma sequência rígida, existindo frequentemente interacções entre elas.

Na abordagem tradicionalmente adoptada da modelização deste problema de decisão consideram-se as seguintes fases: definição da rede de transportes; definição das linhas que constituem a oferta ao público; caracterização dos horários das linhas; geração de serviços de viaturas; geração de serviços de pessoal tripulante e finalmente o escalamento do pessoal tripulante.

As três primeiras fases do processo têm como finalidade a caracterização do serviço prestado ao público, isto é, a estrutura da rede de transportes, as linhas oferecidas e a frequência das viagens em cada uma das linhas. Esta tarefa é tradicionalmente pouco optimizada, sendo a sua resolução baseada na experiência e na observação do comportamento de soluções anteriormente adoptadas. As fases de geração dos serviços das viaturas e de geração dos serviços do pessoal tripulante são aquelas que costumam ser alvo de estudos com vista à sua optimização, como são disso exemplo os estudos efectuados por Freire de Sousa (1988) e Sousa (1986).

Como na implementação de sistemas deste tipo cada uma das fases geralmente corresponde a um módulo de software, vamos passar a referenciar cada uma destas fases por módulo, ver Figura 1. Esse módulos são brevemente apresentados na secções que se seguem.



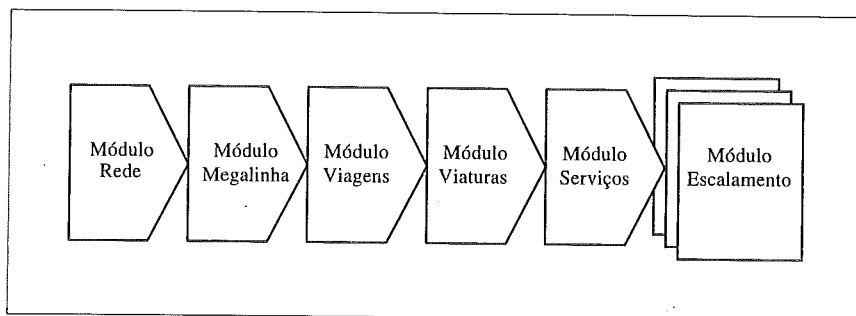


Figura 1: Os módulos (fases) do Planeamento Operacional

### 1.1.1 Módulo Rede

Neste módulo efectua-se a definição da Rede de Transportes.

Uma rede de transportes é caracterizada através da especificação de todos os pontos que nela desempenham alguma função de relevo, como exemplo podemos referir os seguintes: terminos das linhas; pontos de rendição das tripulações; intersecções de linhas; estações de recolha, pontos de entrada e de saída das viaturas nas linhas. A estes pontos vamos chamar "Nós" da rede.

A seguir à caracterização dos nós há que definir as ligações existentes entre eles. Para tal vamos recorrer aos "Segmentos". Os segmentos, correspondendo a arcos orientados de um grafo, são a entidade que permite estabelecer as ligações entre nós adjacentes.

### 1.1.2 Módulo Megalinha

Neste módulo é efectuada a caracterização dos "Percurso", das "Linhas" e das "Megalinhas" da rede de transportes.

O primeiro passo a realizar nesta fase do problema é a definição dos percursos da rede. Por percurso entende-se um conjunto ordenado de segmentos para o qual vão ser definidas viagens, sendo assim possível definir os vários trajectos percorridos em cada uma das linhas. De referir que entre dois nós da rede podem existir vários percursos alternativos, mas que cada percurso apenas pode pertencer a uma linha. A seguir à definição dos percursos temos que passar à definição das linhas que vão servir o público. Estas linhas não são mais do que um grupo de percursos que no seu conjunto vão constituir um horário ao público.

Neste módulo ainda temos a caracterização das megalinhas. Por megalinha entende-se um conjunto de linhas e de percursos que em certos casos é conveniente agrupar com vista à elaboração de um horário conjunto (de viagens, de viaturas ou de serviços). A megalinha é assim uma entidade que permite agrupar outro tipo de entidades com vista a uma gestão comum. Uma descrição mais detalhada encontra-se em INEGI 1991.

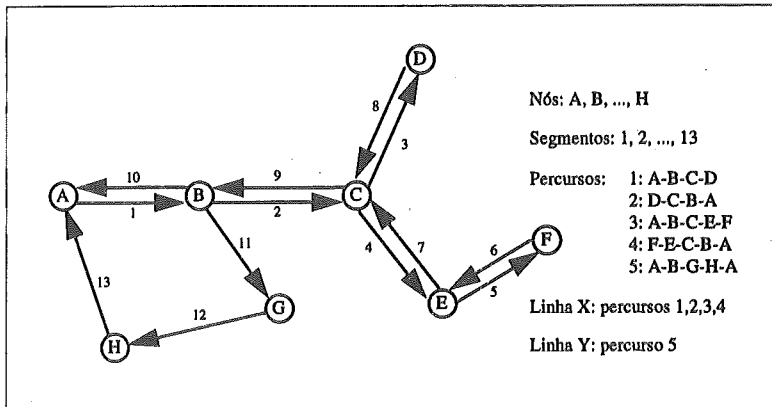


Figura 2: Exemplo de uma megalinha

Na Figura 2 é apresentado um exemplo no qual temos uma megalinha que engloba duas linhas (X e Y). A linha X é caracterizada por quatro percursos, dois para as viagens de ida e outros dois para as viagens de volta. Assim, é necessário planejar as viagens nos diferentes percursos da linha de maneira a que estas possuam um período compatível nos segmentos compreendidos entre os nós A e C. A linha Y é constituída por apenas um percurso e, uma vez que esse percurso possui um segmento comum à linha X, a formação de uma megalinha que englobe as duas linhas permite beneficiar de um planeamento simultâneo das viagens a serem efectuadas nas duas linhas.

### 1.1.3 Módulo Viagens

Neste módulo é efectuada a caracterização do "Horário" de cada uma das megalinhas.

O horário de uma megalinha é um conjunto estruturado de informação que descreve de forma concisa o grupo de viagens associadas a essa megalinha. Por viagem entende-se o movimento de uma viatura num percurso, percurso esse que define a ligação entre dois nós da rede. A partir de estudos de mercado é analisada a frequência desejada de transportes para cada megalinha em cada período do dia (por exemplo horas de ponta e horas mortas) e em cada época do ano (férias, inverno). Cada viagem deve pertencer a um dos seguintes tipos, ou se trata de uma "Viagem Singular" que foi criada individualmente, ou então pertence a um conjunto de viagens que se realizam com uma determinada periodicidade entre dois pontos da rede, tratando-se assim de uma "Viagem Periódica".

Um dado importante na definição dos horários das linhas é o facto de nestas poderem existir vários percursos alternativos, ou seja, nem todos os veículos com o mesmo número (afectos à mesma linha) percorrem trajectos idênticos. Normalmente esses percursos possuem uma parte significativa comum, havendo assim a necessidade de sincronizar as viagens nos diferentes percursos por forma a que estas tenham uma periodicidade aceitável ao longo de toda a linha. A necessidade de sincronizar as viagens em percursos de linhas diferentes pode ser contemplada com a criação de megalinhas para gestão comum dessas viagens.

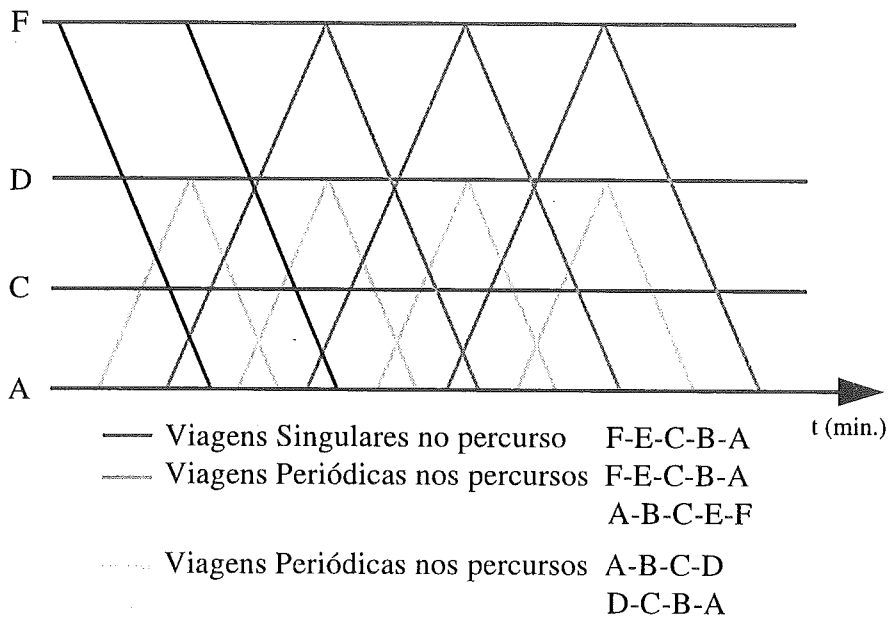


Figura 3: As viagens de uma megalinha

Na Figura 3 mostra-se como pode ser efectuada a especificação das viagens para a linha X, pertencente à megalinha da Figura 2. Assim, foi definido para cada percurso de ida um grupo de viagens periódicas, o mesmo acontecendo para cada percurso de volta. As viagens periódicas foram especificadas de forma a ficarem devidamente espaçadas nos segmentos comuns aos quatro percursos da linha. Foram ainda especificadas duas viagens singulares (de F para A) que permitem assegurar as primeiras viagens de volta no percurso 4.

#### 1.1.4 Módulo Viaturas

Após estar definido o conjunto de viagens que para cada linha vai caracterizar o horário ao público, é necessário agrupar essas viagens constituindo "Serviços de Viaturas". Esse agrupamento deve ser feito por forma a que, com o menor número possível de viaturas, seja garantido o cumprimento dos horários ao público.

No caso em que cada viatura circula exclusivamente numa linha (ou num conjunto de linhas próximas), o estabelecimento dos horários das viaturas é uma tarefa relativamente simples. Tal deve-se à maneira como as viagens são especificadas. Em geral cada viagem de um término a outro é seguida de uma viagem em sentido oposto, como se pode ver no exemplo da Figura 3. Em alguns casos de transportes urbanos e em geral nos casos suburbanos ou interurbanos, a situação pode ser radicalmente diferente, tornando-se num problema não trivial que exige o recurso a técnicas matemáticas de optimização mais sofisticadas. Como se pode ver no exemplo da Figura 4, nas redes do tipo suburbano os percursos têm pontos coincidentes. Nestes casos há a necessidade de efectuar viagens de ligação sem passageiros, o que origina a criação de segmentos em vazio.

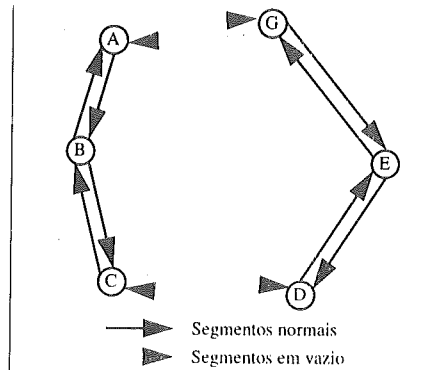


Figura 4: Exemplo de uma rede suburbana

### 1.1.5 Módulo Serviços

Neste módulo é efectuada a geração dos "Serviços do Pessoal Tripulante". A esta operação de definição de serviços de pessoal corresponde o planeamento dos serviços a efectuar num dia de trabalho por motoristas genéricos, isto é, são definidos os serviços de acordo com os diferentes planos de trabalho admissíveis mas sem ter em vista qualquer motorista em particular. Os serviços gerados por este módulo terão que estar de acordo com um conjunto de restrições estabelecidas por legislações laborais e por acordos com os trabalhadores. Estas restrições têm a ver, por exemplo, com duração máxima de serviço ou a duração dos intervalos para refeições. Geralmente, os serviços de pessoal são de um dos seguintes tipos: serviços do tipo contínuo; serviços de duas ou mais etapas.

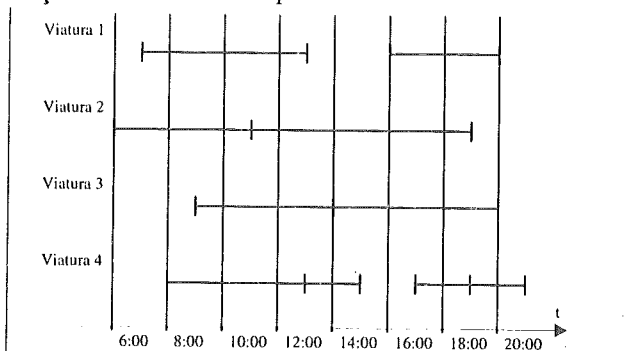


Figura 5: A decomposição das viagens das viaturas em tramos elementares

A definição dos serviços é feita por megalinha, sendo previamente necessário decompor as viagens a cumprir por cada viatura em "Tramos" elementares. Um tramo elementar corresponde ao intervalo definido pelas horas de passagem de uma viatura em dois pontos de rendição consecutivos. Durante esse intervalo não é possível a substituição das tripulações. Na Figura 5 temos um exemplo da decomposição em tramos elementares das viagens a efectuar por quatro viaturas distintas. A geração dos serviços a efectuar pelas tripulações consiste na formação de sequências de tramos elementares que constituam serviços de acordo com as regras.

### 1.1.6 Módulo Escalamento

A fase seguinte do Planeamento Operacional de Sistemas de Transportes é a correspondente ao "Escalamento" do Pessoal Tripulante. Para efectuar o escalamento é necessário receber do módulo de serviços o "Detalhe de Serviços", isto é, um documento que reúne todos os serviços que deverão ser executados.

O escalamento é a única fase do planeamento que tem de ser efectuada diariamente e tem como finalidade a afectação dos serviços de pessoal, que se pretendem ver realizados num determinado dia, ao pessoal disponível. É depois de efectuado o escalamento que se sabe quem vai fazer o quê em cada dia. Na próxima secção apresenta-se em detalhe a definição desta fase do processo.

### 1.2 O Escalamento

O escalamento corresponde à geração dos horários das tripulações. Os recursos humanos, cada vez mais, representam um factor com custos importantes no funcionamento de qualquer empresa, facto este que ainda se reveste de maior relevância nas empresas de transportes colectivos uma vez que estas necessitam de um número significativo de tripulações. Do referido se conclui ser este um processo que exige um estudo cuidado e rigoroso, donde podem resultar grandes benefícios.

O escalamento tem ainda actualmente a particularidade de deter uma abordagem distinta em cada empresa de transportes e de não estar muito optimizado. Um estudo efectuado acerca da forma como decorre o Planeamento Operacional em algumas das mais importantes empresas de transportes colectivos Portuguesas permitiu verificar uma certa homogeneidade de tratamento nos módulos de rede, megalinha, viagens, viaturas e serviços, de tal forma que foi possível adaptar um modelo comum para estas fases do processo. Quanto ao módulo de escalamento, a tentativa de estabelecer uma base de dados comum revelou-se bastante difícil, não só porque as variáveis em jogo nem sempre eram as mesmas mas também porque o mesmo se poderá dizer do processo de geração das escalas.

Apenas as empresas de transportes Americanas utilizam um processo simples para a elaboração das escalas, processo esse baseado na antiguidade dos funcionários. Os tripulantes são ordenados pela sua antiguidade na empresa, sendo a lista percorrida no sentido decrescente e a cada funcionário atribuído o serviço disponível que merece a sua preferência. Nestas empresas não há a preocupação de uniformizar as cargas horárias e consequentemente a remuneração dos vários funcionários. Nas empresas Europeias os tripulantes são agrupados por categorias, correspondendo a cada uma um determinado salário. Assim sendo, há a preocupação de criar programas de trabalho individuais que se estendem ao longo de vários dias, ao fim dos quais as cargas horárias são equilibradas.

A escala consiste num documento que, em cada dia, associa um serviço a cada trabalhador. A partir dos serviços de pessoal, gerados no módulo de serviços, e das disponibilidades do

peçoal tripulante, determinadas pela secção de gestão de pessoal para um dia em particular, é feita a afectação dos motoristas disponíveis pelos serviços que se pretendem realizar.

A quantidade de serviços que diariamente é necessário realizar não é constante. Variam ao longo de um dia pelo facto de ser necessário um maior número de veículos a circular nas horas de ponta. Ao longo de uma semana também variam conforme se trate, por exemplo, de um dia útil ou não, e ao longo de um ano conforme se esteja a planear os serviços de épocas de férias ou não.

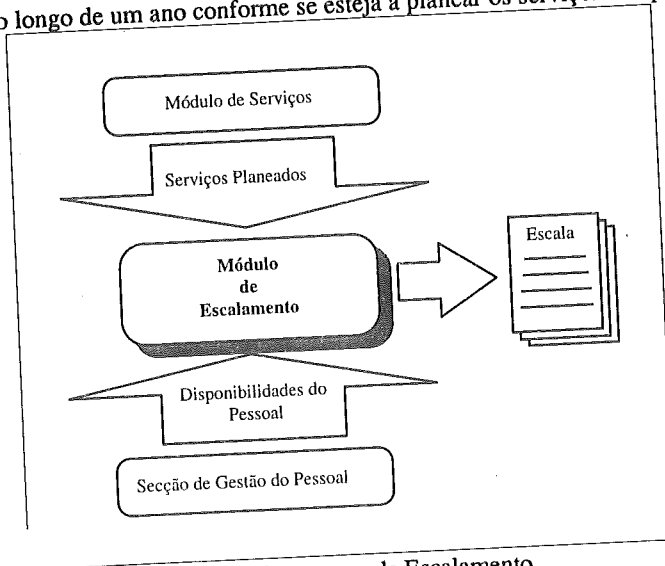


Figura 6: O processo de Escalamento

As principais dificuldades relativas à elaboração das escalas surgem, em primeiro lugar, devido ao grande volume de informação que é necessário manipular diariamente, informação essa relativa a um número substancial de motoristas e serviços. Em segundo lugar aparece um elevado número de restrições impostas pela necessidade de uma distribuição homogénea dos serviços pelos motoristas (com vista a manter o equilíbrio salarial dentro da empresa), pela tentativa da utilização dos recursos da empresa de uma forma o menos dispendiosa possível e por um conjunto de preferências dos funcionários que deverão ser satisfeitas na medida do possível. As preferências dos funcionários podem ser manifestadas por pedidos que se referem tanto à alteração da sua situação na empresa como à obtenção de licenças que possibilitem a sua ausência em determinados dias.

### 1.3 O Escalamento no STCP

Este trabalho tem como finalidade a definição de um Sistema de Apoio à Geração de Escalas (SAGE), sistema esse que terá como objectivo fornecer um conjunto de ferramentas que permitam, de forma prática, manipular toda a informação necessária à geração das mesmas. Está a ser utilizado como exemplo particular o processo de geração de escalas actualmente utilizado no STCP (Serviço de Transportes Colectivos do Porto). Como tal, vamos caracterizar de uma forma mais detalhada o escalamento nesta empresa.

### **Escala Geral e Escala de Extraordinários**

O Escalamento no STCP tem como objectivo final a afixação de dois documentos: a "Escala Geral" e a "Escala de Extraordinários". A escala geral engloba todos os serviços de carácter regular, ou seja, que se efectuam quase todos os dias da semana, como é o caso dos serviços que se efectuam nos dias úteis. A escala de extraordinários engloba aqueles serviços que devido ao seu carácter temporário, por exemplo os serviços alterados devido a obras nas vias, inviabilizariam a utilização de uma escala modelo, justificando assim a sua inclusão num documento separado.

### **Organização dos Serviços de Transporte**

A secção responsável pelo escalamento obtém da secção de movimento, responsável pelo módulo de serviços do planeamento operacional, um documento designado por "Detalhe de Serviços". É através do detalhe que a secção de escalamento tem conhecimento dos serviços que são necessários assegurar em cada dia.

No STCP, cada serviço tem previsto o motorista que o deverá realizar. A identificação do motorista afectado a um determinado serviço é efectuada de forma diferente consoante se trate de um serviço fixo ou de um serviço pertencente a um grupo. Uma forma de conseguir uniformizar a carga horária dos motoristas pertencentes à mesma categoria é a formação de grupos de serviços a assegurar em regime rotativo.

**Grupo de Serviços:** conjunto de serviços ao qual está afectado um grupo de tripulantes que os asseguram em regime rotativo, avançando periodicamente para o serviço seguinte e voltando ao primeiro depois de fazer o último. As rotações podem ser diárias ou semanais, isto é, os tripulantes podem passar para o serviço seguinte diariamente ou semanalmente.

Os grupos de serviços são os mesmos para todos os detalhes, surgindo assim a necessidade de associar a cada grupo, os serviços correspondentes de cada detalhe utilizado. Como o número de serviços a efectuar nos dias úteis é superior ao dos sábados e domingos, e para que a rotação dos motoristas pelos serviços dos grupos não seja interrompida, recorre-se aos "Serviços Suprimidos".

**Serviços Suprimidos:** são aqueles aos quais não corresponde uma tarefa real e que são definidos apenas para permitir dar continuidade às rotações dos motoristas.

**Serviços Fixos:** aqueles que são assegurados todos os dias pelo mesmo motorista, excepto nos dias de folga, férias ou qualquer outro tipo de ausências.

Os serviços nocturnos costumam ser aqueles que são assegurados em regime de serviço fixo. Um motorista que esteja afectado a um serviço fixo deverá ter associado um serviço com o mesmo número em cada detalhe (por exemplo, o serviço 1801 é assegurado em regime de fixo pelo motorista 425). No entanto, os serviços correspondentes a um determinado número não têm as mesmas características nos diferentes detalhes, verificando-se geralmente que, quer os serviços fixos quer os serviços rotativos, apresentam diferenças em relação aos serviços

correspondentes em outros detalhes. As diferenças referidas nem sempre são muito significativas, consistindo em pequenas alterações nas horas de início e fim dos serviços.

Para caracterizar uma megalinha temos então que começar por definir quais os seus grupos de serviços. O passo seguinte consiste em integrar em cada grupo os serviços associados de cada um dos detalhes, e também para cada detalhe identificar quais os serviços fixos.

Para clarificar o processo de organização dos serviços de uma megalinha vamos recorrer ao exemplo da Figura 7 que é baseado numa megalinha real (Linha 61). Esta megalinha tem os seus serviços agrupados em dois grupos: o grupo de serviços contínuos e o grupo de serviços com intervalo. O grupo de serviços contínuos contém, para os três detalhes (útil, sábados e domingos ou feriados), os serviços numerados de 150 a 157. No entanto o serviço 150 de segunda a sexta inicia às 12:00 e termina às 20:25, aos sábados é suprimido e aos domingos e feriados começa às 12:33 e termina às 17:25. O grupo de serviços com intervalo vê todos os seus serviços suprimidos tanto aos sábados como aos domingos e feriados. A estes dois grupos, que têm os seus serviços assegurados em regime rotativo por um grupo de motoristas, juntam-se alguns serviços nocturnos a assegurar em regime de serviço fixo (serviços 175, 176 e 177).

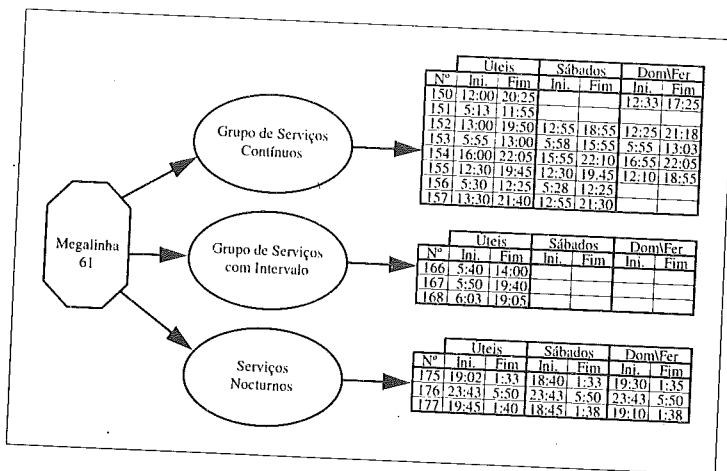


Figura 7: Exemplo dos grupos de serviços de uma megalinha

### Características e Disponibilidades do Pessoal Tripulante

Depois de disponível a informação relativa aos serviços que é necessário assegurar temos que passar à análise das disponibilidades do pessoal tripulante. No STCP o pessoal tripulante pertence a um dos três grupos seguintes: Pessoal "Encaixado"; Pessoal "Firme" e Pessoal Escalado ou "Supra".

Entende-se por pessoal encaixado aquele que tem serviço fixo ou que está associado a um grupo de serviços que são assegurados em regime rotativo. Este pessoal conhece com antecipação o serviço que vai realizar. O pessoal firme é aquele que se encontra provisoriamente em substituição do pessoal encaixado ausente por um período relativamente longo (baixas,



férias). O pessoal escalado ou supra é aquele que não tem serviço fixo, substitui no dia a dia o pessoal encaixado e firme nas ausências que não estão previstas a longo ou médio prazo.

A secção de gestão de pessoal deve fornecer, para cada dia, uma relação da situação prevista para cada motorista, situação esta que poderá ser por exemplo: de serviço; de férias; de licença. A partir dessa informação, e da escala do dia anterior, são escalados os motoristas encaixados e firmes nos serviços que lhes estão destinados e assinaladas as situações que impedem alguns deles de assegurar os serviços respectivos. A fase seguinte consiste em escalar o pessoal supra disponível nos serviços que ficaram por cobrir, tendo sempre em atenção a necessidade de compatibilizar as exigências dos serviços com a experiência do pessoal. Se o pessoal supra não for em número suficiente para garantir a realização de todos os serviços, os serviços menos prioritários não são realizados e os restantes deverão ser assegurados em regime extraordinário.

O processo acaba com a afixação das escalas com dois dias de antecedência em relação ao dia a que dizem respeito, as modificações necessárias que surgem após a afixação das escalas são efectuadas nas próprias estações.

## **2. O Sistema de Apoio à Geração de Escalas (SAGE)**

### **2.1 Objectivos principais do sistema a desenvolver**

O Sistema de Apoio à Geração de Escalas, que está a ser desenvolvido no âmbito deste trabalho, tem como principais objectivos disponibilizar: um conjunto de ferramentas que permitam, de forma prática, manipular o grande volume de informação necessário à geração das mesmas; um conjunto de ferramentas que permitam a automatização de algumas operações do processo de escalamento; um processo de validação automática do cumprimento dos principais requisitos do processo.

Da informação necessária ao escalamento apenas uma pequena parcela é partilhada com as demais actividades de planeamento operacional de sistemas de transportes, o que lhe confere alguma autonomia. De facto, para levar a cabo a elaboração das escalas é apenas necessária a informação relativa aos serviços que deverão ser assegurados no dia a que a escala diz respeito e a informação relativa ao pessoal disponível para esse mesmo dia (suas características e disponibilidades).

### **2.2 Os outros sistemas envolvidos no processo**

O Sistema está a ser desenvolvido de forma a poder ser utilizado independentemente de outros sistemas de apoio ao processo de Planeamento Operacional. No entanto, tendo em vista que se utiliza como exemplo o caso do STCP, onde outros dois sistemas deverão juntamente com um sistema do tipo do SAGE auxiliar o Planeamento Operacional, um problema importante é o estudo das interacções entre o SAGE e os outros sistemas intervenientes.

### 2.2.1 O sistema GIST

Um dos Sistemas é o GIST, Gestão Integrada de Sistemas de Transportes, e que tem a seu cargo o Planeamento Operacional até à geração dos serviços de Pessoal. Este sistema está a ser desenvolvido tendo como plataformas um IBM RISC 6000 com ambiente de sistema operativo 'UNIX', linguagem de programação 'C' norma 'ANSI', protocolo de comunicação interactivo cliente-servidor do tipo de janelas 'X11', protocolo de comunicações assente em 'TCP/IP', ambiente gráfico 'OSF-Motif', sistema de gestão de bases de dados 'ORACLE', com interface em linguagem de definição/interrogação 'SQL'.

As interacções de outros sistemas com o GIST deverão ter por base a linguagem SQL para a selecção da informação, e ficheiros ASCII e uma rede do tipo ethernet para a transferência dos mesmos.

### 2.2.2 O sistema GOPT

O GOPT, Gestão Operacional de Pessoal Tripulante, é um sistema que está a ser desenvolvido pelo STCP, em ambiente AS400, e que tem como função a gestão da informação relativa às disponibilidades do pessoal tripulante. Sendo assim, é função do GOPT a gestão relativa aos pedidos efectuados pelo pessoal, no sentido de garantir o equilíbrio das concessões no que diz respeito por exemplo às férias, descansos planeados e licenças. Deverá portanto ser possível ao GOPT fornecer ao SAGE uma relação diária das disponibilidades relativas a cada um dos elementos do pessoal tripulante. Toda a informação deverá ser acedida através de ficheiros ASCII.

### 2.3 A plataforma informática do SAGE

A autonomia referida do SAGE, as capacidades gráficas do ambiente Windows e a intenção de não sobrecarregar o Sistema GIST (na fase de especificação e prototipagem) com o elevado volume de informação manipulado pelo processo de geração da escala, levou a que o protótipo do Sistema de Apoio à Geração de Escalas esteja a ser desenvolvido num ambiente PC-WINDOWS tendo como base o Microsoft Access, sistema de gestão de bases de dados.

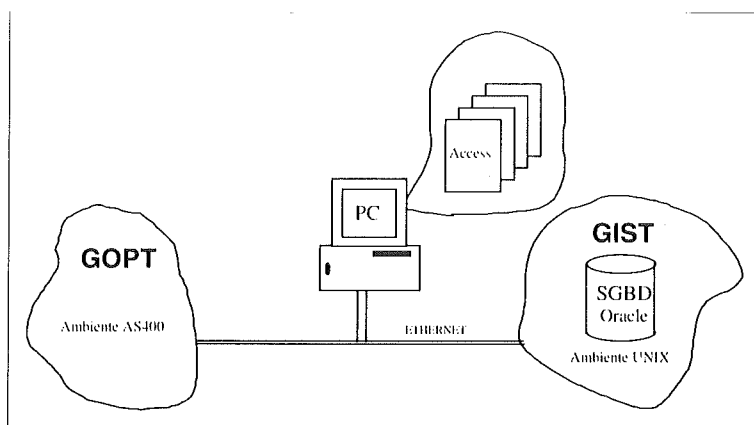


Figura 8: A plataforma de hardware do SAGE

Os factos anteriormente referidos justificam a necessidade do estabelecimento de protocolos de comunicação entre o SAGE e os outros sistemas que deverão ser utilizados na Gestão Operacional de Transportes Colectivos, por parte da empresa em questão. Enquanto que o sistema GIST deverá fornecer a informação relativa aos serviços de pessoal que deverão ser assegurados no dia a que a escala diz respeito, o GOPT deverá fornecer os dados relativos às disponibilidades do pessoal tripulante.

## **2.4 Interfaces e processos de comunicações**

Para conseguir uma colaboração positiva entre os diferentes sistemas envolvidos no Planeamento Operacional da empresa em causa é necessária uma especificação cuidada das interfaces de comunicação e dos processos de comunicação. De referir que todas as trocas de informação são efectuadas através de redes do tipo Ethernet.

### **2.4.1 Protocolo GIST**

Em relação ao GIST é necessário importar a informação relativa aos serviços a assegurar. O conjunto de serviços sobre o qual se vai elaborar a escala é bastante estável, apenas sendo modificado quando se verificam alterações na rede de transportes (quer devido a obras quer devido a alterações na oferta ao público), ou quando se consegue obter uma melhor solução através da utilização do módulo de geração de serviços de pessoal. Toda a informação recebida automaticamente poderá ser actualizada ou modificada manualmente.

Por outro lado, há um conjunto de informação que sendo bastante estável, permite optar por um processo de manutenção independente nos dois sistemas. Tal informação diz respeito às estações de recolha existentes e aos tipos de veículos incluídos na frota da empresa.

### **2.4.2 Protocolo GOPT**

Em relação ao GOPT existem dois tipos de troca da informação necessários ao processo. O primeiro tem carácter diário, e diz respeito às disponibilidades do pessoal, isto é, todos os dias o sistema terá de receber um conjunto de informação que indica quais os motoristas que pode escalar no dia a que diz respeito a Escala a elaborar. O segundo tipo diz respeito à informação relativa às características do pessoal tripulante, sua experiência, categoria e práticas com os diferentes tipos de viaturas. A informação do segundo tipo referido é relativamente estável mas, no entanto, à que garantir a coerência com a informação que consta no GOPT.

## **2.5 O sistema de informação local**

O objectivo principal no processo de especificação da base de dados local ao Sistema de Apoio à Geração de Escalas foi o de definir uma estrutura de informação que, sendo geral, torne possível uma utilização eficiente de toda a informação necessária ao processo.

Embora o sistema tenha como exemplo o caso concreto do STCP, pretende-se a sua futura adaptação a outras empresas. Para atingir estes objectivos foi utilizada a metodologia OMT (Object Modeling Technique) (Rumbaugh et al., 1991), que pelo facto de ser uma metodologia

orientada por objectos torna possível a definição de forma clara de todas as entidades envolvidas no processo.

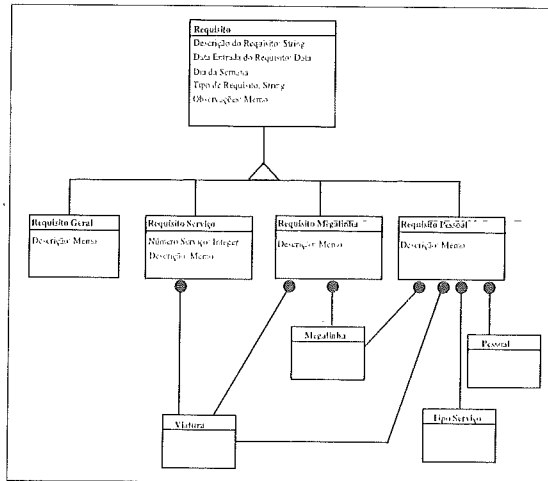


Figura 9: Exemplo da estrutura da Base de Dados

## 2.6 As interfaces com o utilizador

A interface com o utilizador é uma interface típica do ambiente gráfico Microsoft Windows, como ilustra a figura seguinte. Esta figura apresenta a janela que permite definir os requisitos (neste caso um requisito de uma megalinha) que deverão ser validados no decorrer do processo de elaboração das escalas.

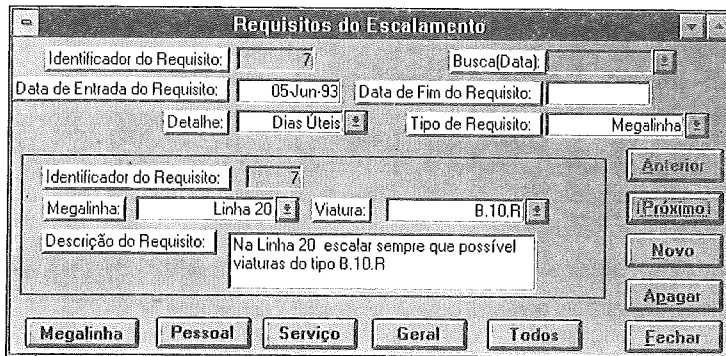


Figura 10: Interface para definição de pedidos de motoristas

O SAGE terá ainda de produzir um conjunto de documentos impressos, nomeadamente a escala geral e a escala de extraordinários, documentos esses que serão afixados para informar os motoristas dos serviços que lhes estão destinados. Estes documentos terão de possuir um formato bem definido, uma vez já se ter verificado ser de difícil aceitação por parte dos utilizadores de sistemas como este, a alteração do formato dos documentos que têm vindo a utilizar ao longo dos anos.

associados quer às diferentes categorias de motoristas, quer aos diferentes tipos de serviços. Será também possível avaliar a uniformidade da carga horária pelos diferentes motoristas, assim como o cumprimento das regras de segurança no trabalho impostas por legislação laboral e por acordos com os sindicatos.

Dentro dos desenvolvimentos que se julgam poder a vir a ser efectuados temos a inclusão de um módulo de processamento de salários, um módulo de Gestão de Pessoal, e a integração de ferramentas de apoio à decisão desenvolvidas em estudos anteriores, nomeadamente o algoritmo para ordenação dos serviços de transportes que pertencem a um grupo de serviços (Vasconcelos Ferreira 1994). Nesse trabalho, a ordenação dos serviços de um grupo pretende "determinar a ordem pela qual devem ser dispostos de modo a que um tripulante que os realiza um após outro, passando do último ao primeiro, veja minimizada a variação da amplitude dos intervalos de descanso" (op.cit. pp 62).

### Referências

- [1] Borges, J.L. (1994), Protocolos de Comunicação do SAGE com outros Sistemas Envolvidos no Escalamento, documento desenvolvido no âmbito de um projecto conjunto com o STCP.
- [2] Cunha, J.F., Sousa, J.P., Galvão, T. e Borges, J.L. (1993), A Decision Support System for the Operational Planning at Mass Transport Companies, apresentado no "Sixth International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport", Lisboa.
- [3] Freire de Sousa, J. (1988), Desenvolvimento de um Módulo Interactivo para a Geração de Serviços de Tripulações em Transportes Colectivos Urbanos, dissertação apresentada no Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa para a concessão do grau de Mestre em I.O e E.S..
- [4] Freire de Sousa, J. (1991), A computer based interactive approach to crew scheduling, *European Journal of Operational Research* 55, 382-393.
- [5] Galvão, T. (1993), Algoritmos para a Geração de Serviços de tripulações em empresas de transportes colectivos, relatório realizado no âmbito da disciplina de Projecto (Iniciação à Dissertação), integrada no Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, edição de 91/92.
- [6] INEGI (1991), Projecto de um Sistema de Apoio à Decisão para o Planeamento Operacional de Sistemas de Transportes Colectivos, documento de especificação de um sistema de apoio à decisão desenvolvido por um grupo de investigadores do INEGI em colaboração com o DEIO.
- [7] Rumbaugh, J., Blaha, M., Premerlani, W., Eddy, F., Lorensen, W. (1991), *Object-Oriented Modeling and Design*, Prentice-Hall.
- [8] Sousa, J.P. (1986), Um Sistema de Apoio à Decisão para a Elaboração de Horários de Viaturas e Tripulações em Serviços de Transportes Colectivos Urbanos, dissertação apresentada ao Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa para a concessão do grau de Mestre em I.O e E.S..
- [9] Sousa, J.P., Guimarães, R.C. (1986), A Decision Support System for Vehicle and Crew Scheduling in Urban Transport Services, *O.R. Models in Microcomputers*, eds. J.D. Coelho e L.V. Tavares, North Holland.
- [10] Vasconcelos Ferreira, J.A., Guimarães, R.C. (1994), A Travelling Salesman Model of the Sequencing of Duties in Bus Crew Rotas, aceite para publicação em *Journal of the Operational Research Society*.
- [11] Vasconcelos Ferreira, J.A. (1988), Concepção de um Módulo Interactivo para Geração de Escalas de Pessoal Tripulante em Transportes Colectivos Urbanos, dissertação apresentada ao Instituto Superior Técnico da Universidade de Técnica de Lisboa para a concessão do grau de Mestre em I.O. e E.S..



# REGRA DE PRIORIDADE DINÂMICA PARA SEQUENCIAMENTO DE OPERAÇÕES

**José Fernando Gonçalves**

Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Rua dos Bragas  
4099 PORTO CODEX

**Jorge José de Magalhães Mendes**

Departamento de Engenharia Informática  
Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Rua de São Tomé  
4200 PORTO

## Abstract

Industries manufacturing a wide range of products and using multi-stage processing systems are faced with a difficult task when it comes to delivery date quotation and production scheduling. The most common decision support systems for aiding in this type of task are based on MRP systems and simulation models. The behavior of the manufacturing system workcenters is often modeled through the use of local priority rules (SPT, MS, EDD and so on). In this paper we present a "look-ahead" dispatching rule which basis its decisions on local and global information. The rule was tested on a set random generated problems and presented the best performance in terms mean flow time and of tardiness.

## Resumo

Neste artigo apresenta-se uma regra de prioridade para o sequenciamento de operações em ambientes de produção cujo planeamento tem por base sistemas MRP. A regra apresentada para além do estado do posto de trabalho corrente usa também uma previsão do estado futuro dos restantes postos. A aplicação da regra a um conjunto de problemas teste demonstrou que esta apresenta um desempenho superior em relação às regras tradicionais orientadas a datas de entrega.

## Keywords

Dispatching Rules, Scheduling, SPT, EDD

## 1. Introdução

O cumprimento das datas de entrega é cada vez mais um factor de competitividade sendo crucial para assegurar vendas futuras. É vulgar que as empresas industriais desenvolvam planos que asseguram uma entrega imediata ou que minimizem os atrasos. A construção de planos de fabrico e de entrega recorre normalmente a sistemas de planeamento agregado tipo MRP e à simulação do funcionamento dos postos de trabalho através de regras de prioridade.

As decisões de calendarização de tarefas/operações em sistemas de produção do tipo "Job-Shop" e na qual os produtos são fabricados em vários níveis é frequentemente realizado em

duas fases. Na primeira fase é efectuado um planeamento na qual se distribuem de uma forma agregada as ordens de fabrico pelas várias semanas do horizonte de planeamento. A segunda fase consiste na libertação das ordens de fabrico e no acompanhamento destas através da oficina por forma a garantir o plano elaborado na primeira fase.

Neste artigo apresenta-se uma regra de prioridade que permite controlar a libertação e a evolução das ordens de fabrico na oficina por forma a obter atrasos reduzidos em relação ao planeado.

## **2. Revisão da literatura**

A natureza combinatória dos problemas de calendarização de operações em ambientes de produção tipo "Job-Shop" levou vários investigadores a testar regras de prioridade para centros de trabalho. Excelentes resumos de resultados estão disponíveis em Panwalker e Iskander [1977], Blackstone, Philips e Hogg [1982], Baker e Kanet [1983]. Panwalker e Iskander por exemplo classificaram 113 regras de prioridade analisadas por vários autores e apresentam um resumo destas por tipo de problema e medida de desempenho.

Em muitos casos a regra S.P.T. (Shortest Processing Time) é superior a outras regras sempre que a medida de desempenho é a utilização das máquinas ou o tempo médio de fluxo. Contudo, dado que esta regra dá prioridade às operações com menor tempo de processamento, as ordens de fabrico que possuam operações com longos tempos de processamento ficarão bastante atrasadas ou poderão mesmo nunca ser acabadas. Em face disto, não é surpreendente que a regra S.P.T. não responda bem em situações em que a medida de desempenho seja o cumprimento das datas de entrega.

Trabalhos de investigação têm demonstrado que em sistemas de produção tipo "Job-Shop" preocupados em satisfazer datas de entrega, as regras de prioridade orientadas a datas de entrega são as mais apropriadas, por exemplo, Goodwin e Goodwin [1982], Goodwin e Weeks [1986], Gray e Hoesada [1991].

A maioria das regras publicadas na literatura e que são orientadas a datas de entrega usam apenas informação local, isto é, informação relativa às tarefas ou operações sendo o estado de carga dos postos da oficina ignorado. O objectivo deste artigo é salientar a importância da incorporação, em regras de prioridade orientadas a datas de entrega, do estado de carga dos postos. Esta preocupação fundamental está na base do desenvolvimento da regra que a seguir se apresenta.

## **3. Nova regra de prioridade**

As regras de prioridade utilizam-se para definir a ordem em que devem ser processadas as operações que se encontram em fila de espera nos diversos centros de processamento. As regras locais ignoram por completo o que se passa na oficina, comportando-se de forma a que, em termos de tomada de decisões, cada posto de trabalho seja uma ilha. A definição de prioridades de processamento baseia-se apenas em atributos das operações nomeadamente a



data de entrega, a data de início de fabrico, o tempo correspondente às operações que faltam processar, etc.

O sistema de sequenciamento de operações em ambientes fabris do tipo "Job-Shop" ( como é o caso das empresas metalo-mecânicas), baseia-se em planos agregados produzidos por sistemas MRP, Tersine [1987]. O sistema MRP utiliza as data de entrega aos clientes e o tempo médio de fluxo na oficina (prazo de entrega ou "lead-time") para obter a datas de início e de fim de fabrico. A data de fim de fabrico (data de entrega) e/ou a data de início de fabrico são posteriormente utilizadas para definir a prioridade de libertação das ordens de fabrico. As regras de prioridade mais usadas em sistemas MRP são:

**Data de Entrega, DE** - uma operação terá maior prioridade de processamento quanto menor for a data de entrega. Por exemplo, uma operação que tenha como data de entrega 93-04-03 terá maior prioridade de processamento do que outra que tenha como data de entrega 93-04-12.

**Folga Mínima, FM** - uma operação terá maior prioridade de processamento quanto menor for a folga. A folga é definida como a data de entrega menos o tempo de processamento. Por exemplo no caso de duas operações com datas de entrega iguais a 93/04/17 e 93/04/25 e tempos de processamento iguais a 4 e 15 dias respectivamente as folgas seriam respectivamente 93/04/13 e 93/04/10. A segunda operação teria neste caso maior prioridade de processamento dado que 93/04/10 é menor do que 93/04/13.

O facto de as regras de prioridade locais não terem em conta o estado da oficina, e portanto processarem as operações sem saberem quem irão servir e qual o seu estado foi a razão motivadora para o desenvolvimento de uma nova regra.

Na procura de uma nova heurística foram tidos em conta os seguintes factores:

- i) Prioridades definidas através das datas de entrega propostas pelo MRP.
- ii) Estado de carga da oficina, nomeadamente das filas de espera dos postos de trabalho.
- iii) Caso as prioridades de processamento definidas em i) não sejam afectadas, dever-se-á procurar equilibrar as cargas dos centros, considerando que o cumprimento do plano definido pelo MRP tem prioridade sobre qualquer outro objectivo.

A regra proposta serve para definir qual a operação a iniciar processamento em determinado posto de trabalho que ficou desocupado.

Com vista a facilitar a exposição da heurística definiu-se a seguinte notação:

#### Notação

(j,i) - operação i da ordem de fabrico j.

C<sub>(j,i)</sub> - centro de processamento da operação (j, i).

$I_{(j,i)} = \{ (k,n) \mid (k,n) \in C_{(j,i)} \cap P(k,n) > P_{(j,i)} \}$  conjunto das operações afectadas ao centro  $C$  com maior prioridade do que a operação  $(j, i)$ .

$P_{(j,i)}$  - prioridade de operação  $(j, i)$ . A prioridade de cada operação é definida em função da regra de prioridade local (menor data de entrega, folga mínima, etc).

$TEP_{(j,i)}$  - data de entrada em processamento da próxima operação,  $(j, i+1)$ , no centro destino caso todas as operações sejam processadas de acordo com as prioridades.

$TP_{(j,i)}$  - tempo de processamento da operação  $(j,i)$

$c, k$  - centro de processamento.

$F_C$  - fila de operações do centro  $C$ .

$TRP_C$  - tempo restante de processamento no centro  $C$ .

$CG_C$  - carga de trabalho do centro  $C$  (tempo).

$CD_C$  - o conjunto dos centros destino onde se irão processar as operações  $(j, i+1)$  e tal que  $(j, i) \in F_C$ .

Dado que a presente regra utiliza tanto a prioridade local como a carga dos postos será designada por regra Prioridade Carga (PCG)

#### Algoritmo PCG:

**Passo 1** - Para todas as operações  $(j, i)$  na fila do centro  $C$ ,  $F_C$ , calcular

$$TEP_{(j,i)} = \max \left\{ TP_{(j,i)} + \sum_{(k,n) \in I_{(j,i)}} TP_{(k,n)}, TRP_{C_{(j,i+1)}} + \sum_{(k,n) \in I_{(j,i+1)}} TP_{(k,n)} \right\}$$

$$CD_C = \{ C_{(j,i+1)} \mid (j,i) \in F_C \}$$

Caso  $CD_C = \{\emptyset\}$

Terminar.

Caso contrário

Para todos os centros destino  $k$  pertencentes a  $CD_C$  calcular a carga de trabalho (soma do tempo que falta para acabar as operações que estejam em curso com os tempos de processamento das operações em fila de espera).

$$CG_k = TRP_k + \sum_{(j,i) \in F_k} TP_{(j,i)}$$

**Passo 2** - Calcular  $k^*$ , centro de processamento pertencente a  $CD_C$  com menor carga,

$$k^* = \operatorname{argmin}_{k \in CD_C} \{ CG_C \}$$

**Passo 3** - Seja  $(j, i)^*$  a operação  $(j, i)$  da fila de espera  $F_C$  com maior prioridade e que se destina ao centro  $k^*$ ,

$$(j, i)^* = \operatorname{argmax}_{(j,i) \in F_C} \{ P_{(j,i)} \}$$

$$c_{(j,i+1)} = k^*$$

Seleccionar provisoriamente para processamento a operação  $(j, i)^*$ .

Para todas as operações  $(j, i) \neq (j, i)^*$  calcular  $TEP_{(j,i)}^*$  assumindo que a operação  $(j, i)^*$  seria processada em primeiro lugar e que todas as restantes seriam processadas de acordo com a prioridade.

Caso  $TEP_{(j,i)}^* \geq TEP_{(j,i)}$

Seleccionar definitivamente a operação  $(j, i)^*$  para processamento e terminar.

Caso contrário

$$CD_C = CD_C \setminus \{k^*\} \text{ e regressar ao passo 2.}$$

#### 4. Exemplo

Com vista a ilustrar a heurística iremos utilizar o exemplo que se segue (ver figura 1).

A máquina M3 encontra-se desocupada e é necessário seleccionar uma operação da fila de espera.

No exemplo o par  $(j, i)$  identifica a operação (ordem de fabrico, número de operação),  $P_{(j,i)}$  a prioridade de processamento,  $TP_{(j,i)}$  o tempo de processamento,  $TRP_C$  o tempo restante de processamento no centro  $c$  (M1 e M2) e  $c_{(j,i+1)}$  o centro destino.

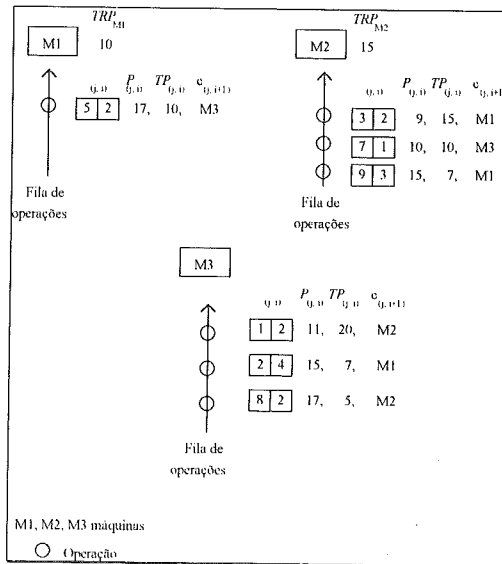


Figura. 1 - Exemplo ilustrativo da regra PCG.

#### Passo 1

Para todas as operações da fila do centro a que pertence a máquina M3 é necessário calcular o tempo de entrada em processamento de cada uma das operações.

Para a operação (1, 2) o tempo de entrada em processamento  $TEP_{(1,2)}$  no centro destino é

$$TEP_{(1,2)} = \max$$

isto é,

$$TEP_{(1,2)} = \max \{20, 15+25\} = 40,$$

para a operação (2, 4) o  $TEP_{(2,4)}$  é

$$TEP_{(2,4)} = \max\{7+20, 10\} = 27,$$

e para a operação (8, 2) o  $TEP_{(8,2)}$  é

$$TEP_{(8,2)} = \max\{5+27, 15+32\} = 47.$$

O conjunto dos centros destino,  $CD_{M3}$  é

$$CD_{M3} = \{M1, M2\}.$$

A carga de trabalho para cada um dos centros destino é

$$CG_{M1} = TRP_{M1} + \sum_{(j,i) \in F_{M1}} TP_{(j,i)}$$

isto é,

$$CG_{M1} = 10+10 = 20$$

e, da mesma forma, para M2

$$CG_{M2} = TRP_{M2} + \sum_{(j,i) \in F_{M2}} TP_{(j,i)}$$

$$CG_{M2} = 15+(15+10+7) = 47$$

### Passo 2

O centro de processamento com menor carga de trabalho,  $c^*$ , é o centro M1 com 20 unidades de tempo

$$k^* = \underset{k \in CD_{M3}}{\operatorname{argmin}} \{20, 47\} = M1.$$

### Passo 3

Seja  $(j, i)^*$  a operação  $(j, i)$  da fila de espera  $F_{M3}$  com maior prioridade e que se destina ao centro  $k^*$ ,

$$(j, i)^* = \underset{k \in F_{M3}}{\operatorname{argmin}} \{P_{(2,4)}\} = (2,4)$$

$$c_{(j,i+1)} = M1$$

A operação (2, 4) é seleccionada, provisoriamente, para processamento no centro M3, dado que é a operação da fila do centro M3 com maior prioridade.

Para cada uma das operações  $(j, i) \neq (2, 4)$  calcular o  $TEP_{(j,i)}$ , assumindo que a operação (2, 4) será a primeira a ser realizada seguida das operações (1, 2) e (8, 2).

Para a operação (1, 2) o  $TEP_{(1,2)}$  é

$$TEP_{(1,2)} = \max\{20+(7), 15+(15+10)\} = 40,$$

e para a operação (8, 2) o  $TEP_{(8,2)}$  é

$$TEP_{(8,2)} = \max\{5+(20+7), 15+(15+10+7)\} = 47.$$

Dado que o processamento da operação (2, 4) em primeiro lugar não implica aumento dos valores de  $TEP_{(1,2)}$  e  $TEP_{(8,2)}$  a operação (2,4) será seleccionada definitivamente.

O lançamento desta operação em fabrico não altera o tempo de entrada em processamento das restantes operações na fila de operações inicial do centro M3. Observe-se ainda que a

operação (2,4) após ser sido processada irá para o centro M1 que é o centro destino com menor carga.

### 5. Teste de desempenho

Esta secção tem como objectivo avaliar o desempenho da regra proposta. Seguidamente apresentam-se as regras de prioridade, a dimensão dos problemas e os critérios de avaliação utilizados.

A regra PCG foi testada num conjunto de problemas gerados aleatoriamente. As características dos problemas gerados têm por objectivo representar, de acordo com o conhecimento dos autores, o tipo de ambiente fabril encontrado nas empresas portuguesas do ramos têxtil e metal-mecânico.

Cada problema consiste em 1500 ordens de fabrico. O número de operações por ordem de fabrico foi gerado a partir de uma distribuição uniformemente distribuída entre 1 e 7. Os tempos de operação foram gerados a partir de uma distribuição uniformemente distribuída entre 0 e 10 horas.

Com vista a testar a influência da carga e do número de postos no desempenho da regra foram gerados três problemas para cada combinação de cargas (80%, 90% e 100% ) e de número de máquinas (10 e 20).

As regras testadas são ambas orientadas a datas de entrega e utilizavam a Folga Mínima (FM) e Data de Entrega (DE) como prioridade. Esta selecção resulta do facto de vários trabalhos de investigação terem demonstrado que em sistemas de produção tipo "Job-Shop", preocupados em satisfazer datas de entrega, as regras de prioridade orientadas a datas de entrega são as mais apropriadas, Goodwin e Goodwin [1982], Goodwin e Weeks [1986], Gray e Hoesada [1991].

As medidas de desempenho utilizadas foram:

- Número de OF's Concluídas Sem Atraso
- Somatório dos Atrasos
- Tempo Médio de Fluxo

Os resultados obtidos para o total de 18 problemas perfazendo 27000 ordens de fabrico e aproximadamente 108000 operações são apresentados nas tabelas 1 e 2.

As figuras 2 e 3 apresentam os ganhos obtidos pela utilização da regra PCG em conjugação com as prioridades FM e DE.

# Máquinas = 10

Carga	Problema	# O.F.realizadas s/ atraso		Somatórios dos atrasos		Tempo médio de fluxo	
		F.M.	PCG-F.M.	F.M.	PCG-F.M.	F.M.	PCG-F.M.
80%	1	1292	1303	13650	13508	175	164
	2	1342	1334	11794	11847	194	184
	3	1298	1306	12021	12178	201	186
	Média	1311	1314	12488	12511	190	178
90%	1	1046	1063	31714	31601	178	171
	2	1083	1097	32356	31573	191	176
	3	1083	1095	30864	30283	167	156
	Média	1071	1085	31645	31152	179	168
100%	1	323	364	140392	135575	181	167
	2	416	452	124199	121351	229	208
	3	476	537	115731	111078	189	167
	Média	405	451	126774	122668	200	181

# Máquinas = 20

Carga	Problema	# O.F.realizadas s/ atraso		Somatórios dos atrasos		Tempo médio de fluxo	
		F.M.	PCG-F.M.	F.M.	PCG-F.M.	F.M.	PCG-F.M.
80%	1	1154	1148	22196	22087	141	134
	2	1133	1155	24827	23891	133	129
	3	1136	1144	24729	24431	144	141
	Média	1141	1149	23917	23470	139	135
90%	1	1031	1036	35681	34907	131	129
	2	806	819	47015	46394	141	140
	3	640	669	57490	56019	134	129
	Média	826	841	46729	45773	135	133
100%	1	339	372	128256	127010	148	149
	2	301	328	120347	117448	132	134
	3	247	320	120345	116577	138	137
	Média	296	340	122983	120345	139	140

Tabela 1 - Resultados da simulação para as regras PCG-FM e FM

# Máquinas = 10

Carga	Problema	# O.F.realizadas s/ atraso		Somatórios dos atrasos		Tempo médio de fluxo	
		D.E.	PCG-D.E.	D.E.	PCG-D.E.	D.E.	PCG-D.E.
80%	1	1299	1307	13273	13153	177	164
	2	1341	1342	11221	11519	194	185
	3	1312	1316	11519	11785	203	189
	Média	1317	1322	12004	12152	192	179
90%	1	1053	1058	30186	30101	178	170
	2	1090	1100	31750	30768	194	177
	3	1094	1093	29832	29696	170	157
	Média	1079	1084	30589	30188	181	168
100%	1	338	365	135509	133168	182	171
	2	448	478	120208	118177	230	207
	3	501	541	112294	108215	190	163
	Média	429	461	122670	119853	201	180

# Máquinas = 20

Carga	Problema	# O.F.realizadas s/ atraso		Somatórios dos atrasos		Tempo médio de fluxo	
		D.E.	PCG-D.E.	D.E.	PCG-D.E.	D.E.	PCG-D.E.
80%	1	1154	1158	21392	20961	141	135
	2	1150	1143	23519	24539	133	131
	3	1151	1144	24160	24046	144	141
	Média	1152	1148	23024	23182	139	136
90%	1	1031	1032	34610	34216	132	129
	2	828	852	45052	44850	142	138
	3	658	685	54252	54006	134	132
	Média	839	856	44638	44357	136	133
100%	1	360	394	123344	123973	149	149
	2	316	349	115121	113946	132	131
	3	285	355	114133	113216	138	136
	Média	320	366	117533	117045	140	139

Tabela 2 - Resultados da simulação para as regras PCG-DE e DE

## F.M. v.s. PCG - F.M.

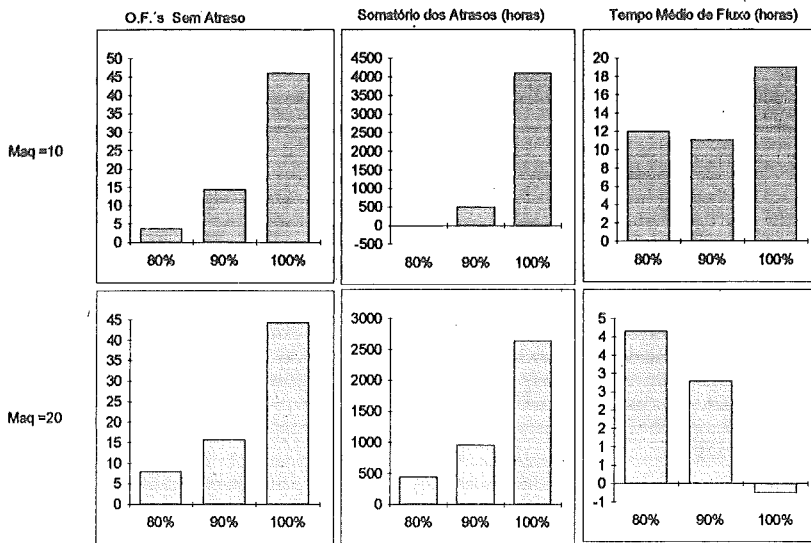


Figura 2 - Ganho da regra PCG-FM em relação à regra FM

## D.E. v.s. PCG - D.E.

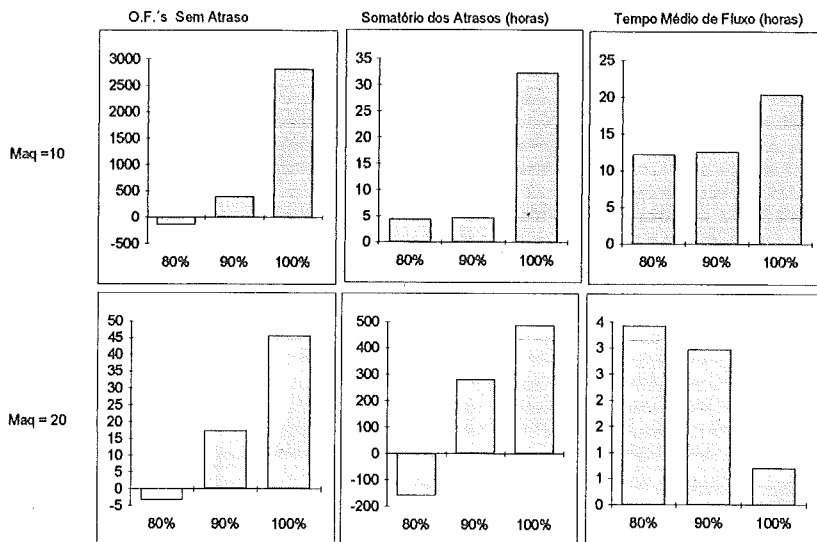


Figura 3 - Ganho da regra PCG-DE em relação à regra DE

## 6. Implementação e eficiência computacional

As regras de prioridade podem ser utilizadas em tempo real ou em simulações. No primeiro caso, as regras são utilizadas para ajudar a definir a ordem de processamento das várias operações. No segundo caso, o objectivo é obter o estado futuro do sistema ao longo de certo



intervalo de tempo e com isso poder obter informação tal como, por exemplo, datas de entrega de encomendas a clientes.

Dada a simplicidade da regra PCG e dado que toda a informação necessária ao seu funcionamento se encontra já disponível em todos os sistemas comerciais MRP não é de prever qualquer dificuldade na implementação desta em tais sistemas.

As simulações foram efectuadas num computador pessoal com um processador INTEL 80486 a 66 MHZ. Os tempos médios de processamento por problema (1500 ordens de fabrico e aproximadamente 6000 operações) foram

Regras	Tempo médio de processamento (em segundos)
DE e FM	184 ( $\approx$ 3 minutos)
PCG com DE e FM	623 ( $\approx$ 10 minutos)

Da tabela anterior é possível concluir que em termos computacionais a nossa implementação da regra PCG consome cerca de 3,3 vezes mais tempo de CPU do que as regras simples.

No caso da utilização das regras prioridade em tempo-real para controle do lançamento em fabrico a diferença de tempos (0,03 s/operação e 0,1s/operação) não tem qualquer significado prático.

No caso da utilização das regras prioridade em simulação, a diferença de tempos também não tem qualquer significado prático dado que as simulações são realizadas com intervalos de tempo muito maiores do que a sua duração (meios-dias, dias, semanas).

## 7. Conclusões

Nos 18 problemas testados a regra PCG melhorou significativamente os valores obtidos pelas regras de prioridade DE e FM em relação aos três critérios (Nº de OF's realizadas sem atraso, Soma de atrasos e Tempo médio de fluxo).

À medida que a carga aumenta, o ganho de desempenho da regra PCG vai-se acentuando.

Em termos globais, a regra PCG utilizando a regra de prioridade DE localmente apresenta os melhores resultados.

Dado o bom desempenho, a grande flexibilidade e adaptabilidade às condições de carga nos centros de trabalho, a utilização da regra PCG-DE na geração de planos de fabrico em conjugação com sistemas MRP para ser aconselhável.

## 8. Extensões

Como investigação futura seria útil analisar e avaliar as seguintes versões da regra PCG:

- Incluir a possibilidade de a máquina ficar desocupada embora tendo operações na fila de espera;
- Incluir a possibilidade de existirem várias máquinas por posto de trabalho.

## 1. Introdução

O exercício de planeamento de redes de distribuição consiste basicamente na decisão de construção de ramos novos, reforços e subestações, de forma a responder às necessidades futuras dos consumos. As decisões obedecem a critérios económicos (minimização de custos de investimento e exploração) e de fiabilidade (minimização da energia não fornecida), e devem respeitar as restrições técnicas: limites térmicos e queda de tensão máxima admissível. Existe habitualmente uma restrição adicional de radialidade, uma vez que as redes de distribuição são mais facilmente exploradas recorrendo a uma configuração radial. Outros critérios, como a estética, impacto ambiental e impacto social, são também por vezes tidos em conta (Kagan e Adams, 1993).

A abordagem habitual deste problema adopta uma modelização linear, incluindo variáveis inteiras correspondentes às decisões de construção ou não de um ramo ou subestação num determinado período, e considera apenas uma função objectivo, relacionada com os custos de investimento e exploração. O problema é então formulado como um problema linear inteiro-misto, geralmente de grande dimensão.

Mais recentemente, a modelização evoluiu para a consideração efectiva de outros critérios, conduzindo a problemas multiobjectivo. O conceito de solução óptima deixa de fazer sentido, uma vez que os diferentes objectivos são conflituosos, podendo obter-se, apenas, o conjunto das soluções eficientes (ou não-dominadas), de entre as quais será escolhida a solução preferida, após a incorporação das preferências do Agente de Decisão.

A consideração da incerteza associada aos consumos futuros é um factor adicional de dificuldade. Tentativas de modelização probabilística não se revelaram adequadas ao planeamento a médio e longo prazo, por ausência de informação estatística em relação a novas zonas, novos consumidores, etc. A incerteza é mais bem descrita através de distribuições de possibilidade que permitem incorporar, seja declarações qualitativas de peritos, seja tipificações de consumidores com base em agrupamentos imprecisos (*fuzzy clusters*). Miranda e Matos (1988,1989) desenvolveram a conceptualização fundamental desta abordagem, que permite fazer a extensão dos modelos tradicionais determinísticos de forma a incorporar a incerteza dos consumos futuros.

O progressivo aparecimento de produtores independentes ligados à rede de distribuição, fornecendo energia de forma não controlável pelo distribuidor, introduz novas incertezas no processo de planeamento, semelhantes, em geral, às dos consumos futuros. O impacto destas instalações tende a ser, no entanto, mais importante, dada a grande variabilidade que tem que ser admitida para a produção, em face da completa independência de que dispõem os produtores em relação às empresas de distribuição. Trata-se de um aspecto cuja modelização necessita, ainda, de algum refinamento suplementar.

Nas restantes secções da comunicação, apresenta-se a modelização genérica deste tipo de problemas, nas suas versões estática, dinâmica (multi-período) e incluindo incertezas. Em

seguida, discute-se uma metodologia, baseada em programação linear, que permite gerar um conjunto representativo de planos eficientes, caracterizados em relação ao custo e ao grau de violação das restrições, resultante dos diferentes valores (com diferentes possibilidades) que podem assumir os consumos e as produções independentes. A última secção inclui uma discussão pormenorizada dos aspectos mais relevantes da aplicação prática dos conceitos e métodos expostos, através de um exemplo.

## 2. Planeamento de redes de distribuição

O problema de planeamento da distribuição tem sido largamente abordado na literatura. Destacam-se, a seguir, algumas contribuições que constituem diferentes tendências quer na evolução ao longo do tempo quer no tipo de abordagem do problema. Adams e Laughton (1974) formulam o problema da optimização de redes de distribuição usando um modelo de transporte com custos fixos para um período de tempo, posteriormente (Adams e Laughton 1979) generalizado ao caso multi-temporal. Gönnen e Ramirez-Rosado (1990) propõem uma metodologia pseudo-dinâmica para resolver o problema global do planeamento e expansão formulando o problema como inteiro-misto. Aoki et al. (1990) apresentam um modelo aproximado que ultrapassa as dificuldades colocadas pela resolução de um problema inteiro-misto de dimensões elevadas usando uma heurística de pesquisa local. Nara et al. (1991) seguem a mesma metodologia, introduzindo algumas simplificações e generalizando o modelo à resolução de problemas multi-temporais. Mai recentemente, Kagan e Adams (1993) apresentam o problema com uma formalização multicritério. Consideram vários objectivos: minimização de custos de investimento, maximização da fiabilidade (minimização dos custos da energia não fornecida) e optimização de aspectos que se revelam de difícil implementação prática como minimização do impacto ambiental e maximização (melhoramento) de factores estéticos. As cargas e custos são modelizados recorrendo a *fuzzy sets*. O método de resolução é o proposto por Slowinski (1986) para o planeamento de fornecimento de água em que o problema impreciso é transformado num problema determinístico através da escolha de índices (pessimista e optimista) associados às variáveis imprecisas. O agente de decisão fixa à partida os valores dos índices e a detecção de violações às restrições é verificada *a posteriori* para as soluções eficientes encontradas, podendo dar lugar à rectificação dos índices de segurança. Miranda et al. (1993) apresentam um modelo multi-temporal para o planeamento, reforço e expansão de redes de distribuição de energia eléctrica incluindo minimização de custos de investimento e maximização da fiabilidade. O processo de geração de estratégias multi-temporais recorre a um algoritmo genético que optimiza uma função agregada dos objectivos, produzindo uma "população" de planos cuja análise final cabe ao AD.

## 3. Fomalização do problema

Nas sub-seccões seguintes apresentam-se sucessivamente os modelos determinísticos para um período e para vários períodos, e um modelo multi-temporal em que os dados associados ao

consumo e à produção independente são modelizados, atendendo ao tipo de conhecimento que lhes está associado, com recurso a conjuntos imprecisos (*fuzzy sets*) e distribuições de possibilidade. O problema genérico é multicritério, sendo considerados os seguintes objectivos:

Minimização de custos de investimento da rede, isto é, minimização do investimento na construção de subestações e canalizações.

Minimização de custos de exploração (perdas por efeito Joule).

Maximização da fiabilidade, através da minimização de custos associados à energia não fornecida.

As alternativas viáveis têm que satisfazer restrições técnicas (limites de aquecimento nos ramos e máxima queda de tensão admissível), para além das equações gerais dos circuitos eléctricos (leis de Ohm e de Kirchoff).

### 3.1. Modelo determinístico para um período $i$

A formulação base do problema determinístico (para um período de tempo), é descrita nas equações (1) a (7). As equações (1) a (3) representam as funções objectivo associadas ao cálculo de:

- $c_{inv}$  custo associado ao investimento, construção e expansão de ramos e subestações
- $c_{exp}$  custo de exploração, associado às perdas por efeito Joule
- $c_{enf}$  custo associado à energia não fornecida

sendo:

- $n$  nº total de nós
- $m$  nº total de ramos
- $h$  nº total de períodos
- $\delta$  vector das variáveis de decisão inteiras (ramos activo = 1, não activo = 0)
- $x_i$  vector dos trânsitos de potência nos ramos (período  $i$ )
- $(x_i)_k$  trânsito de potência no ramo  $k$  (período  $i$ )
- $c$  vector dos custos de estabelecimento dos ramos
- $p$  vector dos custos associados às perdas
- $e$  vector dos custos da energia não fornecida por consumidor (distribuída pelos ramos)
- $e_k = k_k \lambda_k \mu_k$ 
  - $k_k$  coeficiente de proporcional ao custo por unidade de energia não fornecida
  - $\lambda_k$  taxa média de avarias associado ao ramo  $k$
  - $\mu_k$  tempo médio de reparação associado ao ramo  $k$
- $A_i$  matriz das incidências nodais (período  $i$ )
- $\bar{X}$  vector dos limites térmicos dos ramos
- $d_i$  vector das injeções (consumos e produtores independentes) nos nós (período  $i$ )
- $\Delta U_i$  vector das quedas de tensão nos nós (período  $i$ )
- $U_{max}$  queda de tensão máxima admissível

$$\min c_{inv} = c_i^t \cdot \delta_i \quad (1)$$

$$\min c_{exp} = p_i^t \cdot x_i \quad (2)$$

$$\min c_{enf} = e_i^t \cdot x_i \quad (3)$$

As soluções estão sujeitas a um conjunto de restrições descritas nas equações (4) a (6).

**sujeito a:**

$$A_i \cdot x_i = d_i \quad (4)$$

$$|(x_i)_k| \leq (\delta_i)_k \cdot (\bar{x})_k \quad k = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$(\Delta U)_j \leq \Delta U_{max} \quad j = 1, \dots, n \quad (6)$$

A função objectivo de minimização do custo das perdas, que é comum a todas as formalizações do problema apresentadas nesta comunicação, é uma linearização por segmentos da função custo não linear, de forma semelhante à usada por Adams e Laughton (1974).

### 3.2. Modelo determinístico multi-temporal

A formalização do problema para o caso multi-temporal é descrita pelas equações (7) a (13):

$$\min c_{inv} = \sum_{i=1}^p c_i^t \cdot \delta_i \quad (7)$$

$$\min c_{exp} = \sum_{i=1}^p p_i^t \cdot x_i \quad (8)$$

$$\min c_{enf} = \sum_{i=1}^p e_i^t \cdot x_i \quad (9)$$

**sujeito a:**

$$A_i \cdot x_i = d_i \quad i = 1, \dots, h \quad (10)$$

$$|(x_i)_k| \leq (\delta_i)_k \cdot (\bar{x})_k \quad i = 1, \dots, h \quad k = 1, \dots, m \quad (11)$$

$$\Delta U_{j,i} \leq \Delta U_{max} \quad i = 1, \dots, h \quad j = 1, \dots, n \quad (12)$$

Para múltiplos períodos de tempo, o conjunto de variáveis de decisão é substituído por tantos conjuntos quantos os períodos de tempo a considerar.

### 3.3. Extensão do modelo para o caso impreciso

O modelo plurianual apresentado na sub-secção anterior é de natureza determinística, ou seja, admite clarividência no conhecimento dos valores futuros dos consumos e produções independentes. Na realidade, porém, existe uma incerteza associada às previsões e estimativas disponíveis para o exercício de planeamento. Tentativas de modelização probabilística desta incerteza resultaram pouco eficazes, dada, por um lado, a falta de informação estatística de suporte, e dada, por outro lado, o facto do planeamento não ser um exercício repetitivo (em

relação a um dado sistema), pelo que carecem de sentido regras de decisão baseadas nos valores esperados dos resultados. A modelização da incerteza nos consumos através de distribuições de possibilidade foi proposta por Miranda e Matos (1988,1989), tendo sido aplicada, nomeadamente, ao planeamento e exploração de sistemas produção/transporte por Saraiva (1992).

O modelo possibilístico desenvolvido nesta secção corresponde à aplicação do princípio da extensão (Zadeh, 1965; Dubois e Prade, 1980) ao modelo determinístico anterior, procurando capturar a imprecisão, não apenas nos consumos e produção independente, mas também aquela associada aos parâmetros das funções objectivo.

$$\min \tilde{c}_{inv} = \sum_{i=1}^p \tilde{c}_i^+ \cdot \delta_i \quad (13)$$

$$\min \tilde{c}_{exp} = \sum_{i=1}^p \tilde{p}_i^+ \cdot \tilde{x}_i \quad (14)$$

$$\min \tilde{c}_{cnf} = \sum_{i=1}^p \tilde{c}_i^+ \cdot \tilde{x}_i \quad (15)$$

sujeito a:

$$A_i \cdot \tilde{x}_i = \tilde{d}_i \quad i = 1, \dots, h \quad (16)$$

$$|(\tilde{x}_i)_k| \leq (\delta_i)_k \cdot (\bar{x})_k \quad i = 1, \dots, h \quad k = 1, \dots, m \quad (17)$$

$$\Delta \tilde{U}_{j,i} \leq \Delta U_{max} \quad i = 1, \dots, h \quad j = 1, \dots, n \quad (18)$$

#### 4. Atributos em ambiente impreciso

A modelização das injeções recorre a conjuntos imprecisos introduz novos factores de avaliação das redes. No caso determinístico, as possíveis configurações para a rede podem ser, viáveis (as que satisfazem as restrições cumprindo os limites técnicos) ou não viáveis. Na extensão ao caso impreciso, a viabilidade passa a estar representada por uma distribuição de possibilidade, sendo mais correcto falar de *grau de violação* das restrições. No caso determinístico, esse grau toma apenas os valores 1 ou 0, consoante a rede é ou não viável. No caso impreciso, Miranda e Saraiva (1992) e Matos e Ponce de Leão (1992,1993), definiram índices de avaliação das diferentes alternativas em relação à sua robustez e à severidade de eventuais violações.

##### 4.1. Robustez e severidade

O critério de robustez, em problemas de planeamento, refere-se à característica de um plano que exprime o grau de confiança ou de adequação que lhe está associado, perante um conjunto de incertezas. Com base na definição de robustez apresentada por Merrill e Wood (1990), define-se índice de robustez,  $\beta = 1 - \alpha_{sup}$ , em que  $\alpha_{sup}$  é o supremo dos valores de possibilidade

para o qual o sistema consegue acomodar toda a incerteza associada às cargas, garantindo o seu funcionamento sem apresentar qualquer violação. O índice associado a esta definição de robustez permite avaliar a configuração proposta quanto ao seu grau de violação dos limites técnicos.

Para melhor caracterização das situações de violação definidas, por Matos e Ponce de Leão (1993), índices de severidade da violação às restrições, que quantificam a gravidade com que um determinado limite é ultrapassado. Nas equações (19) e (20) apresentam-se as expressões associadas ao cálculo de severidade associada aos limites técnicos e à queda de tensão máxima admissível.

$$V_I = \frac{1}{I_{\max}} \int_{I_{\max}}^{\infty} u(I) dI \quad (19)$$

$$V_V = \frac{1}{\Delta V_{\max}} \int_{V_{\max}}^{\infty} u(V) dV \quad (20)$$

Na figura 1 apresentam-se dois casos de violação da corrente máxima admissível ( $I_{\max}$ ), para correntes incertas com distribuição de possibilidade triangular. As duas situações correspondem a diferentes índices de robustez e de severidade associados a uma dada configuração. O caso (a) corresponde à situação onde não há grandes violações ao valor máximo admissível para qualquer combinação de cargas. Não há violação para  $\alpha = 0.2$ , resultando o índice de robustez  $\beta = 0.8$ . Na situação (b) há a hipótese de ocorrência de elevadas violações e da análise do gráfico pode-se concluir que a possibilidade associada a qualquer violação é 10. Em ambos os casos, o índice de severidade  $V_I$  é igual à área a sombreado, dividida por  $I_{\max}$ .

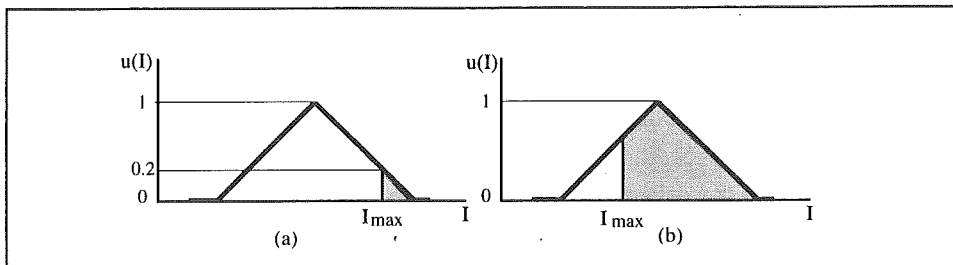


Figura 1 - Dois casos de violação a restrições de aquecimento

#### 4.2. Índices globais

Os índices de robustez e severidade definidos nas expressões (19) e (20) podem agregar-se, conduzindo a índices globais associados a cada configuração. As equações (21) e (22) representam os índices agregados para cada ano  $i$  estando os índices agregados globais, para o

período em estudo, apresentados nas equações (23) e (24):

$$\beta_i = \min \left( \min_{k \in \text{ramos}} \beta_k; \min_{j \in \text{nós}} \beta_j \right) \quad (21)$$

$$V_i = \sum_{k \in \text{ramos}} (V_D)_k + \sum_{j \in \text{nós}} (V_v)_j \quad (22)$$

$$\beta = \min_i \beta_i \quad (23)$$

$$V = \sum_{i=1}^p V_i \quad (24)$$

Estes índices caracterizam cada plano candidato em função da maior possibilidade de violação e da severidade total das violações às restrições técnicas.

### 5. Método de resolução

O problema base de planeamento é de índole combinatória, pelo que a sua resolução exacta, para exemplos de dimensão elevada, está associada a tempos de cálculo inoportáveis. O método utilizado nesta comunicação para a resolução do problema, generalizado ao caso impreciso, tem como base a metodologia desenvolvida por Nara et al. (1991) para o caso determinístico.

As cargas são modelizadas recorrendo a números imprecisos triangulares. Incluem-se no modelo produtores independentes que, sendo unidades não controladas pelo distribuidor de energia eléctrica, possuem características de incerteza também de natureza possibilística. A crescente introdução na rede destes produtores justifica a preocupação em incluí-los especificamente no exercício de planeamento. Numa primeira abordagem, a modelização adoptada para os produtores independentes recorre a funções de pertença triangulares semelhantes às dos consumos.

O problema inteiro-misto é transformado num problema linear associado a um conjunto de heurísticas como Aoki et al. (1990). O algoritmo parte de uma solução radial inicial e gera sucessivas configurações emalhadas e radiais obtidas pela entrada e saída de ramos. A selecção de ramos a entrar e a sair é determinada por uma análise de sensibilidade à variação de custos e de violações das restrições técnicas. Os pormenores do método podem ser vistos em Matos e Ponce de Leão (1992).

Para enriquecer o processo de decisão final, é mantido um saco de soluções que vai sendo actualizado ao longo do processo iterativo. Na fase final do processo é apresentado ao AD um conjunto de planos que correspondem às soluções alternativas encontradas. As soluções são caracterizadas pelos atributos que qualificam o plano de evolução da rede quanto aos custos de investimento, custos de exploração, custos associados à fiabilidade (em fase de inclusão no modelo), robustez e severidade. Tal como em Aoki et al. (1990) e Nara et al. (1991), os custos



de exploração não são representados explicitamente, intervindo heurísticamente no processo de entrada e saída de ramos.

A decisão final envolve uma apreciação multicritério por parte do AD, que poderá envolver o uso de metodologias específicas para ajuda à decisão. Essa fase, no entanto, não é contemplada na presente comunicação.

## 6. Um exemplo de planeamento com produtor independente

Nesta secção utiliza-se o método descrito anteriormente para ilustrar o processo de planeamento de uma pequena rede com hipótese de produção independente. Na figura 2 é apresentado o traçado possível para uma rede em relação à qual se pretende planear a expansão para um período de três anos. A rede é constituída por 11 nós e 18 possíveis ramos. Entre os nós, dois representam subestações (uma existente e outra candidata a construção), um terceiro representa o produtor independente (PI) e os restantes são cargas. A cheio estão representados os elementos da rede, quer subestações quer ramos, já existentes.

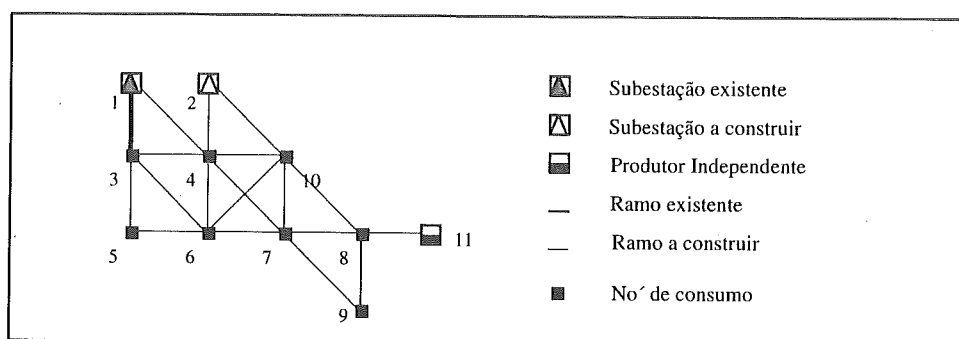


Figura 2 - Configuração da rede teste

Nas tabelas 1 e 2 apresenta-se o conjunto dos dados da rede, incluindo as características eléctricas e custos associados a cada um dos elementos. Na tabela 3, apresentam-se os pontos característicos dos números triangulares que representam as potências injectadas, nos três períodos do estudo. Repare-se que o nó 11 (produtor independente) apresenta valores positivos a partir do ano em que entra em funcionamento, enquanto que às cargas correspondem valores negativos, dada a convenção de sinal utilizada.

Subestação	$I_{max}(A)$	Custo(\$)
1	300	0.0
2	300	300.5

Tabela 1 - Dados das Subestações

Nó i	Nó j	Linha	Resist. ( $\Omega$ )	Imax (A)	Custo (\$)
1	3	4	0.0949	160	0.0
1	4	1	0.0384	50	59.2
3	4	3	0.0127	90	45.0
2	4	2	0.0113	120	7.1
3	5	5	0.0473	50	20.0
3	6	6	0.0142	150	30.0
4	6	7	0.0949	50	10.0
6	7	9	0.0127	150	7.0
7	8	10	0.0113	50	15.0
7	9	11	0.0127	50	7.0
8	9	12	0.0113	50	12.0
7	10	13	0.0113	80	52.0
4	10	14	0.0113	80	22.0
2	10	15	0.0113	160	20.0
8	10	16	0.0127	50	20.0
6	10	8	0.0127	30	20.0

Tabela 2 - Dados das linhas

Nó	Injeções								
	período 1			período 2			período 3		
1	-17,2	-15,0	-12,8	-28,6	-25,0	-21,3	-40,1	-35,0	-29,8
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-12,6	-11,0	-9,4
3	0,0	0,0	0,0	-19,5	-17,0	-14,5	-42,4	-37,0	-21,5
4	-2,3	-2,0	-1,7	-42,9	-30,0	-17,0	-65,3	-57,0	-38,5
5	0,0	0,0	0,0	-11,5	-10,0	-8,5	-28,6	-25,0	-21,3
6	-5,7	-5,0	-4,3	-17,2	-15,0	-12,8	-28,6	-25,0	-21,3
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-32,1	-28,0	-23,8
8	-11,5	-10,0	-8,5	-34,4	-30,0	-25,5	-45,8	-40,0	-34,0
9	-11,5	-10,0	-8,5	-22,9	-20,0	-17,0	-36,6	-32,0	-27,2
10	-5,7	-5,0	-4,3	-22,9	-20,0	-17,0	-51,5	-45,0	-28,3
11	0,0	0,0	0,0	7,0	10,0	15,0	40,8	45,0	50,0

Tabela 3 - Dados das cargas e produtor independente

### 6.1. Caso base

Efectuou-se um primeiro estudo para a rede apresentada, considerando a inclusão de produção independente no nó 11, de acordo com os valores definidos na tabela 3.

Como resultado, obteve-se um conjunto de planos alternativos, correspondentes a diferentes estratégias de evolução da rede ao longo do período em estudo. Na tabela 4 apresenta-se o resumo dos planos eficientes produzidos pelo método e qualificados pelo custo, robustez e severidade tal como definidos nas secções 4.1 e 4.2.

Planos	Custo	Robustez	Severidade
1	190.00	0.000	0.22300
2	420.97	0.834	0.00190
3	413.64	0.857	0.00550
4	493.65	1.000	0.00000

Tabela 4 - Planos eficientes (caso base)

Perante este conjunto de alternativas, o AD optaria de acordo com as suas preferências, que podem contemplar mais os custos ou a qualidade de serviço. Não sendo objecto desta comunicação a discussão da fase final de decisão, suporemos, para exemplo, que o AD escolhe o plano 3, correspondente às redes representadas na figura 3.

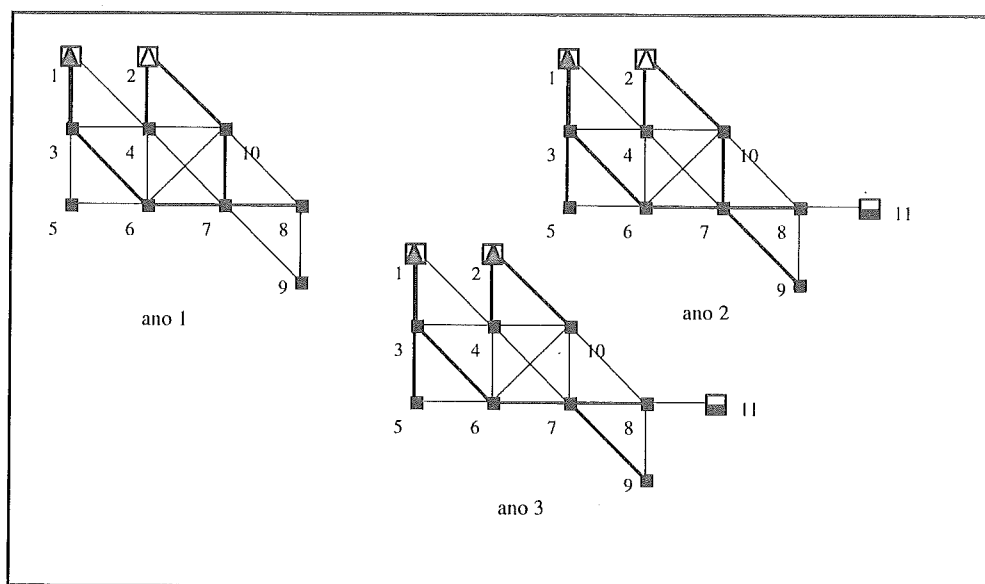


Figura 3 - Plano 3

## 6.2. Estudo complementar

Para além dos factores naturais e de carácter técnico que limitam a acessibilidade da potência do PI, e que estão incorporados na função de pertença da tabela 3, há uma incerteza suplementar que tem que ser considerada. Na verdade, os produtores independentes, sendo entidades autónomas, podem deixar de produzir a qualquer momento, de forma não controlável

pele distribuidor de energia eléctrica. Esta hipótese não está, evidentemente, contemplada na tabela 4.

Para avaliar as possíveis consequências de uma completa indisponibilidade do PI, recalcularam-se os valores de robustez e severidade (o custo não varia) dos planos 1 a 4, na nova situação.

Planos	Custo	Robustez	Severidade
1	190.00	0.000	0.3300
2	413.64	0.000	0.1729
3	420.97	0.000	0.1700
4	493.65	0.714	0.0054

Tabela 5 - Planos eficientes (caso base sem PI)

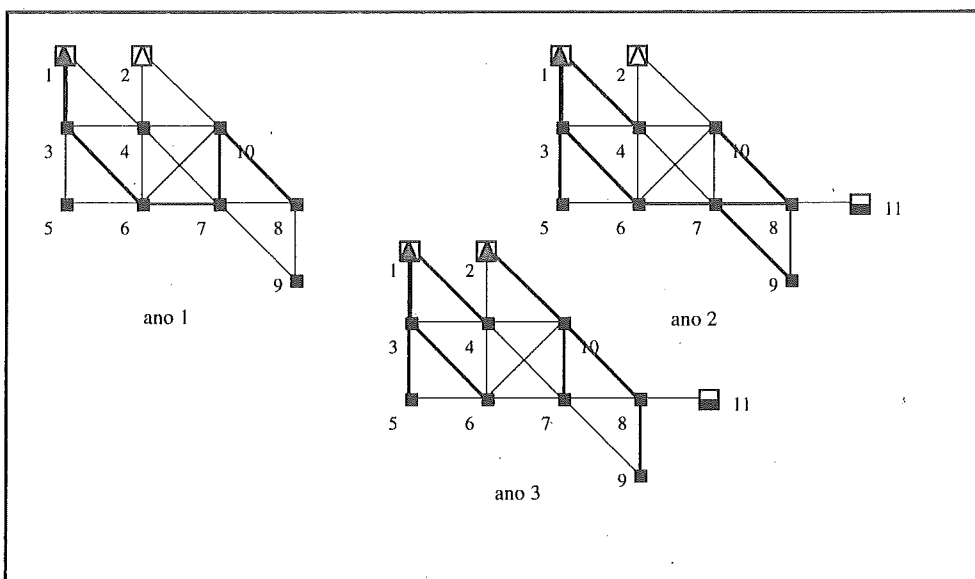


Figura 4 - Plano 4

Como era de esperar, a robustez piorou genericamente, aumentando também a severidade das violações. Em particular, a solução 3, suposta preferida no caso base, apresenta uma robustez nula, o que poderia levar o AD a preferir o plano 4, mais caro mas mais robusto em relação a este cenário de anulação completa da produção independente prevista.

Para completar a análise, realizou-se um novo exercício de planeamento, desta vez supondo à partida a não existência do PI. As alternativas eficientes obtidas incluem os planos 2, 3 e 4 das tabelas 4 e 5, e uma nova alternativa, cujos atributos se apresentam na tabela 6.

Planos	Custo	Robustez	Severidade
5	519.57	1.000	0.0000

Tabela 6 - Plano alternativo sem inclusão do PI

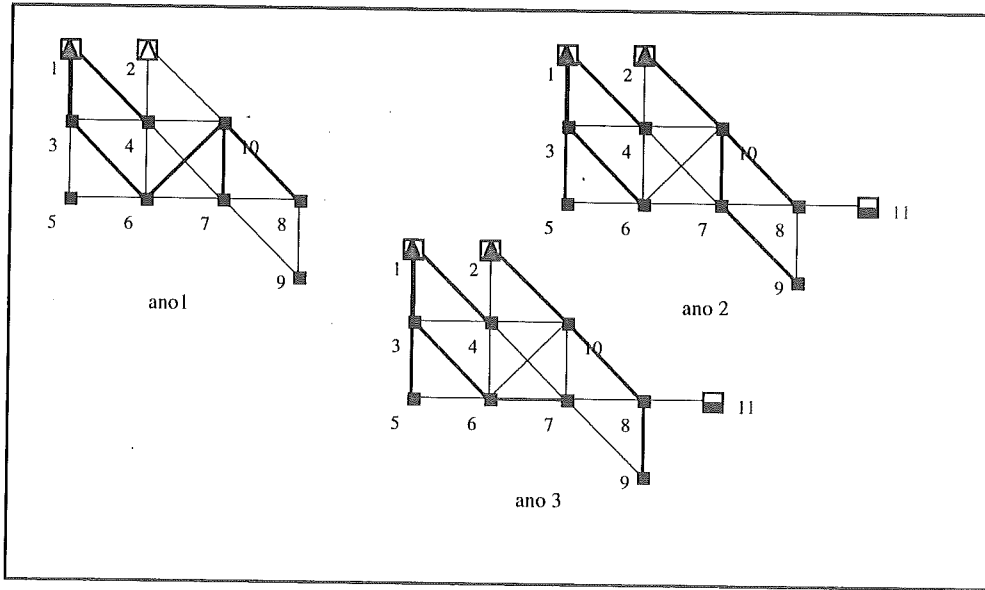


Figura 5 - Plano 5

Esta nova alternativa, que é totalmente robusta sem produção independente seria, como é evidente, uma solução também robusta se a PI estivesse disponível. No entanto, este plano não surgia na tabela 4 devido a tratar-se de uma solução dominada do caso base, pois é mais cara que o plano 4, para a mesma robustez.

### 6.3. Análise global

A conjugação dos resultados do caso base e estudo complementar permite ilustrar três grandes linhas de decisão, reunidas na tabela 7.

Opção	Custo	Robustez	Severidade
Pessimista	519.57	1.000	0.0000
Optimista	413.64	0.857	0.0055
Intermédia	493.65	1.000	0.0000

Tabela 7 - Resumo das opções objecto de discussão

- Opção pessimista** Corresponde ao plano 5. Esta situação é resultado do exercício de planeamento sem inclusão do produtor independente. O AD não está disposto a correr quaisquer riscos, preferindo portanto uma solução que não depende de agentes externos. O plano de expansão apresentado é 100% robusto não apresentando qualquer violação às restrições técnicas. O custo de investimento final é no entanto o maior, (519.57).
- Opção optimista** Corresponde à solução 3. A estratégia proposta nesta solução corresponde a um plano menos caro (413.64), mas a sua adopção engloba alguns riscos de surgirem violações às restrições técnicas, mesmo no cenário de garantia do fornecimento do PI. A ocorrência do cenário de indisponibilidade completa do PI seria bastante gravoso.
- Opção intermédia** O plano 4 tem um custo intermédio entre os extremos anteriores, e apresenta um risco moderado de violações que se fazem sentir apenas na hipótese de indisponibilidade completa do PI.

Com base nesta análise, poderia ser gerada outra classe de opções com base na negociação entre o PI e o AD. O produtor independente compromete-se a fornecer a potência dentro de certas margens (por ex. as da tabela 3) e obtém em troca benefícios económicos ao nível da tarifa. Em face desta garantia, o distribuidor poderia executar um plano mais económico, mantendo uma robustez elevada.

## 7. Conclusões

A presença de incertezas assume um papel importante no processo de decisão associado ao planeamento. Em estudos deste tipo os horizontes temporais envolvidos implicam processos de previsão que na sua maioria não podem ser modelizados com recurso a modelos determinísticos ou probabilísticos. O sucesso do planeamento está fortemente dependente da correcta modelização dessas incertezas, associadas, no caso das redes de distribuição, aos consumos futuros e à possível existência de produtores independentes.

Nesta comunicação mostrou-se como é possível obter um conjunto de planos caracterizados em relação a custos de instalação e violações das características técnicas quando as injeções (cargas e produção independente) são modelizadas com recurso a números imprecisos triangulares.

Discutiu-se também a incerteza de 2ª ordem associada à não controbabilidade dos produtores independentes pela empresa distribuidora, e mostrou-se como estudos condicionados a esta situação podem fornecer ao AD um conjunto de alternativas de decisão que admitem diferentes perspectivas e atitudes perante o risco.

## 8. Bibliografia

- [1] Adams, R.N., Laughton, M.A. (1974), Optimal planning of power networks using mixed-integer programming-Part 1, Proc. IEEE 121.
- [2] Aoki, K. et al. (1990), New approximate optimization method for distribution system planning, IEEE Trans. PWR 5.
- [3] Backlund, Y., Bubenko, J.A. (1979), Computer-aided distribution system planning, EP&ES 1.
- [4] Dubois, P. (1980), Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications, Academic Press.
- [5] El-Kady, M.A. (1984), Computer-aided planning of distribution substation and primary feeders, IEEE Trans. PAS 103.
- [6] Gonnens, T., Foote, B.L. (1981), Distribution-system planning using mixed-integer programming, IEEE Proc. 128.
- [7] Gonnens, T., Foote, B.L. (1982), Mathematical dynamic optimization model for electrical distribution system planning, EP&ES 4.
- [8] Gonnens T. (1986), Electric Power Distribution System Engineering, McGraw Hill Book Company.
- [9] Gonnens, T., Ramirez-Rosado (1987), Optimal multi-stage planning of power distribution systems, IEEE Trans.-PWRD 2.
- [10] Hindi, K.S., Brameller (1977), Design of low-voltage distribution networks: a mathematical programming method, Proc. IEE 124.
- [11] Kagan, N., Adams, R.N. (1993), Electrical Power Distribution Systems Planning Using Fuzzy Mathematical Programming, Power Systems Computer Conference-PSCC, Avignon.
- [12] Kaufman, A., Gupta, M. (1988), Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science.
- [13] Klir, G.J., Folger, T. (1988), Fuzzy Sets, Uncertainty and Information, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [14] Matos, M.A., Ponce de Leão, M.T. (1992), Planeamento de Redes de Distribuição com Cargas Imprecisas: uma Experiência, Congresso da APDIO-IO92, Évora.
- [15] Matos, M.A., Ponce de Leão, M.T. (1993), Electric Distribution System Planning with Fuzzy Loads, 13<sup>o</sup> World Conference on Operations Research, IFORS 1993, Lisboa.
- [16] Merrill, H.M., Wood, A.J. (1990), Risk and Uncertainty in Power System Planning, PSCC, Graz, Austria.
- [17] Miranda, V., Matos M.A. (1988), Determinação de diagramas de carga imprecisos úteis ao planeamento da distribuição de energia eléctrica, Investigação Operacional 7, 25-31.
- [18] Miranda, V., Matos, M.A. (1989), Distribution System Planning with Fuzzy Models and Techniques, Proceedings 10th CIRED (IEE Conference Publication n<sup>o</sup> 305), 472-476.
- [19] Miranda, V., Ranito, J.V., Proença, L.M. (1994), Genetic Algorithms in Optimal Multi-stage Distribution Network Planning, Investigação Operacional 14.
- [20] Miranda, V., Saraiva, J.T. (1992), Fuzzy Modelling of Power System Optimal Load Flow, IEEE Trans. PWR 7.
- [21] Nara, K. et al. (1991), Multi-Year expansion planning for distribution systems, IEEE Trans. PWR 6.
- [22] Ponce de Leão, M.T., Matos, M.A., Miranda, V. (1991), Electrical distribution network planning: concepts and methodologies, 1<sup>o</sup> ELAB, Porto.
- [23] Ponnavaiko, M., Prakasa Rao, K.S., Venkata, S.S. (1987), Distribution system planning through a quadratic mixed integer programming approach, IEEE Trans. PWRD 2.
- [24] Proença, M. (1993), Algoritmos Genéticos no Planeamento da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Eléctrica, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [25] Ramirez-Rosado, I., Gonnens, T. (1990), Pseudodynamic planning for expansion of power distribution systems, IEEE Trans. PWR, Winter Meeting 90.
- [26] Saraiva, J.P. (1992), Application of Fuzzy Sets on Power Systems Modeling and Planning (in portuguese), PhD. Thesis, Oporto Engineering Faculty.
- [27] Slowinski, R. (1986), A Multicriteria Fuzzy Linear Programming for Water Supply Systems Development Planning, Fuzzy Sets and Systems 19, 217-237, North-Holland.
- [28] Sun, D.L., Farris, D.R., Cote, P.J., Shoult, R.R., Chen, M.S. (1982), Optimal distribution substation and primary feeder planning via the fixed charge network formulation, IEEE Transactions PAS 101.
- [29] Thompson, G.L., Wall, D.L. (1981), A branch and bound model for choosing optimal substation location, IEEE Transactions PAS 100.
- [30] Wall, D.L., Thompson, G.L. (1979), Northcote-Green, An optimization model for planning radial distribution networks, IEEE Transactions PAS 98.
- [31] Willis, H.L., Tram, H.N., Powell, R.W. (1984), Northcote-Green, J.E.D., An improved method of extrapolating distribution system load growth, IEEE Transactions PAS 103.
- [32] Zadeh, L. (1965), Fuzzy Sets, Information and Control 8, 338-353.





## HOW TO TEACH/LEARN O.R.?

**René Victor Valqui Vidal**  
Center of Tele-Information and  
Institute of Mathematical Modelling  
The Technical University of Denmark (DTU)  
DK-2800 Lyngby, Denmark

### **Abstract**

Behind the question formulated in this paper lies more fundamental ones: What is O.R.? How to teach a consulting profession? In this paper we show that there are several conceptions of O.R. and therefore different ways to teach O.R.. Learning processes of human beings are also discussed and the relevance of "supervision" for O.R. is also emphasized.

### **Keywords**

O.R., education, learning processes, supervision.

### **1. Introduction**

The question formulated in the title of this paper is of central importance to us, O.R. educators and practitioners. It is strange that such a question has aroused so little attention in the O.R. literature. But behind the above mentioned question lies even more fundamental ones, namely: What is O.R.? and How to teach a consulting profession? All these questions have one thing in common: there is not a single and simple answer to them. This makes any discussion about how to teach/learn O.R. both paradigmatic, and of central relevance in relation to the future of this young discipline.

The ideas presented in this paper are based on my own 25 years of experience as an educator and practitioner of O.R. I have also incorporated related experiences from other consulting disciplines, such as: Social work, therapy, education, psychiatry and cognitive sciences.

In the following next two sections of this paper I give a short discussion to the question: What is O.R.? Thus, Section 2 presents the development of O.R. from the well-known traditional O.R. (empirical, analytical) to the "soft" and to the "critical" O.R. where alternative scientific attitudes and social praxis are required. In this section we want to emphasize that there is not a single answer to the question: What is O.R.? In Section 3, I present my own framework about the nature of O.R.. This is also the one I present to my students. Here, I emphasize four fundamental characteristics of O.R.: a social process, action for change, science of the concrete, and education.

Section 4 deals with the subject of education, where the central concepts of wisdom/cleverness and teaching/learning will be defined. A central theme in this section is: Which role does context play in an individual's knowledge and skills? Here a model for human being's learning processes will be presented. This seems of central relevance to the theme of this paper.

"Supervision" is suggested, in Section 5, as one of the best ways to provide education in O.R. In this section a short introduction on this subject will be given as well as its relevance for O.R. as a consulting orientated discipline. In addition, in Section 6, we will discuss the learning processes of supervised persons and, more specifically, we will present a model that explains the development of an O.R. novice into an O.R. expert.

Finally, the last section contains the concluding remarks and suggestions for further research.

## 2. The Development of O.R.

It is my conviction that most self-reflecting operational researchers are confronted with two serious problems: identity and legitimation.

The problem of **identity** is related to the specification of our abilities: What are we when we call ourselves O.R. workers? Looking in journals or talking with participants in international conferences you will not get any specific answer to this question. Some O.R. people are good at computers and programming. Others are good mathematicians, while others are good socio-psychologists. Some are good model builders, others are good model solvers, while others are good "facilitators". Some are good at identifying problems, others are good at solving problems, while others are good at inventing problems. From a socio-political viewpoint some are traditional and conservative, others are practical and reformist, while others are critical and revolutionaries. This identity problem is not specifically related to O.R. Other older disciplines such as Sociology, Economics, Medicine, Psychology, etc., have a similar problem. Even Mathematics and Computer Sciences have an analogous problem. The main reasons for such a situation cannot be found within these disciplines but primarily it has to be found within the structure and functioning of Society. It is a fact that, firstly, Society influences O.R., and, secondly, O.R. influences Society. The explanation how the dynamics of capitalistic societies shape the theory and practice of O.R. is an area that deserves more research work.

The second problem, the one of **legitimation**, is the problem of explaining to ordinary people why it is necessary for society to educate and use O.R. workers. Obviously, this problem is related to the first one - it is difficult to explain the legitimacy of something that is difficult to define. Other professionals do not have the same problem, e.g. medical doctors, dentists, engineers, computer scientists, etc. while other professionals have a similar legitimation problem, e.g. sociologists, psychologists, philosophers, etc. Mathematicians and

economists do not have similar legitimization problems due, I believe, to the ideological mission they have in Society.

It is a fact that the great majority of O.R. workers are not concerned with these identity and legitimization problems. Some even think that it is not relevant for O.R. to be dealing with such problems. This extreme form of alienation and social irresponsibility are negative forces that work towards the destruction of our own discipline and its social role.

Some operational researchers have been concerned about the development of O.R. Dando and Benett [1] have given an important contribution to the discussion concerning the future of O.R. They suggest that there are three competing "paradigms" in O.R. They labelled these the official, reformist and revolutionary paradigms. The first one they described as corresponding to classical O.R., O.R. as widely practiced and taught. The reformist paradigm embraced the ideas of those who criticize the traditional O.R. and propose a more participative form of O.R. A particular feature of their article was their account of the existence of a third, revolutionary paradigm. The revolutionaries criticize both the official and reformist paradigms for ignoring the social role of O.R. and the social environment within which it is practiced. A very important point in the Dando and Benett argumentation is the assertion that this "crisis" in O.R. is not just about how best to understand the world but also about the kind of social world we wish to produce. These authors could already in 1981 foresee the growth of the reformist paradigm, now-a-days called "soft methods", but we are far from their prediction that the reformist approach is "the immediate victor of the present crisis".

On the other hand, Gault [2] has been concerned with questions about education in O.R. He found out that behind those questions lie an even more fundamental question: What is O.R.? He identifies two forms of O.R.: Technical and social O.R. conceptualized by using Boothroyd's concept of action programme [3]. Action programmes are characterized by the actions that happen, the theories that actors have about their actual and potential actions, and the proposals that are within the programme and across its boundaries. Then, an action programme consists of three core elements: Theories, proposals and actions. Table 1 summarizes the fundamental distinctions between these two types of O.R. when regarded as action programmes.

Core elements	Technical O.R.	Social O.R.
Theory	Actions based on prediction (a belief on positivism and a mechanical world view)	Actions based on education i.e. the development of wisdom (a purposeful world view)
Proposals	Optimization	To provide assistance to improve the quality of actions
Actions	The scientific method (objectivity)	Education and participation (subjectivity)

Table 1 - Technical O.R. vs Social O.R.

Gault emphasizes that a new O.R. framework is emerging: Social O.R.. An important aspect of this new framework is an understanding that the O.R. worker's role is to help others

to solve their problems themselves. This is in contrast to the more traditional view that emphasizes solving the problem for the decision maker, and then present him with this fact in the form of the "optimal solution". He suggests that this new role is similar to that of the teacher's. However, he advances the view that education is more fundamental about encouraging wisdom. Further, since encouraging wisdom is the means by which O.R. workers can help others helping themselves, O.R. can be considered as education.

While Dando and Benett discussed the development of O.R. emphasizing the role of the O.R. worker in Society (social praxis), Gault focused on the kind of activity the O.R. worker is performing: "hard" and "soft" O.R.. Recently, Mingers [4] has given an elucidating presentation of the development of O.R. based on Habermas' theory of knowledge - constitutive interest [5], [6] that deals with the problem of epistemology: the question of the validity of our knowledge of the world. Habermas points out that there are different areas of knowledge with their own criteria of validity. He also shows that knowledge always serves some deep-rooted interest of the human beings. The particular interest constitutes the form of knowledge in a particular domain. Thus, the concept of "knowledge-constitutive interests". Habermas identifies three interests: The technical (interest in the control and manipulation of the physical world), the practical (interest in communicating with and understanding of other people), and the emancipating (interest in developing and liberating ourselves from false ideas). In Table 2 these interests and their characteristics are summarized.

Type of science	Cognitive interest	Social domain	Purpose
Natural Science (empirical, analytical)	Technical	Work	Production/control
Cultural science	Practical	Language/culture	Understanding/(hermeneutics) consensus
Critical sciences	Emancipatory	Power/authority	Enlightenment

Table 2 - Habermas knowledge-constitutive interests [4]

In the above mentioned paper, Mingers shows that the development of O.R. can be conceptualized as successively embodying these three views. First, O.R. developed as technical (traditional, hard, positivistic) interest dealing with the manipulation and control of an objective world by selecting efficient means of achieving pre-defined goals. The criticism of this approach led to the development of practical (soft, hermeneutic) O.R. in which attention focused on the subjective world of personal beliefs and perceptions. The last stage has been a further discussion of the limitations of practical O.R., aiming at critical (liberating, radical, action) O.R.

As far as I can see, I think we have to learn to live with this variety of conceptualization of our discipline, a discussion that by all means will continue in the future. It is our obligation, both as teachers and professionals, to enlighten our students and clients about this diversity of conceptions. Which of the O.R. disciplines is the most suitable one depends on many factors

related to the actual problem to be solved, the organization in question, the operational researchers, and so on.

### 3. What is O.R.?

This is an important question that deserves attention, especially if we later want to discuss how to teach/educate in O.R. Well-known textbooks about O.R. give a distorted view of our discipline. They are not only merely focusing on technical O.R., but even technical O.R. is presented as applied mathematics, using computers, where the objective is not real-life problem-solving but the development of elegant and efficient tools. Even a monumental work about our discipline [7] completely disregards the development described in Section 2.

I believe that our role as O.R. educators is to give an objective presentation of the development of O.R. and let the students learn and develop their own conception, ideas and experiences even if they are probably not matching with our own personal views. We should not **indoctrinate** a specific conception but illustrate the variety, suitability and limitations of diverse approaches, and emphasize that our discipline cannot be reduced to a given set of (mathematical or psychological) tools and techniques. In this connection I think it is fruitful to present a **framework** that characterizes O.R. by four interrelated activities:

- (i) **O.R. is a social process**, where **actors** (clients, managers, decision makers, users), the **researchers** and a **problem** interrelate with the main goal of providing assistance to actors so that the quality of their actions may be improved. I prefer the term actor because it is more general and conveys a more accurate impression of what actually occurs in real-life that involves a system of actors with multiple relationships and roles. Their number, their relationships and their individual goals are even subject to change. Here it is important to emphasize the distinction between a **formal** decision-maker and a **real** decision-maker. For example, it is not unusual that a top manager is a formal decision-maker but in some situations the **real** decision-maker is his secretary. Emphasizing O.R. as a social process is to my point of view of extreme importance instead of the over-focusing on methods and techniques. In real-life O.R. work, this process is the core of our profession.

This process begins with the activities that cause the **genesis** of the problem and ends with real-life **implementation**, if any. Practice has shown that the economic, social, political and environmental **consequences** of the use of O.R. are highly determined by these two initial and final activities, rather than by the specific method and techniques used [8]. In addition, it is difficult to foresee in advance how this process will develop.

- (ii) **O.R. as "action for change"**, where O.R. is used to improve or modify a real-life situation - the actual situation has to be changed - articulated intervention is needed. Action programmes are possessed by individuals, but commonly an action programme is shared by a number of individuals. The work of the operational

researcher is first to find out if an analytical approach is needed at all. In some situations the actors, based on their intuition and experiences, are very good in taking decisions. In such situations O.R. is not needed. This first step of **diagnosis** is of central importance in our work. Lack of implementation, a serious problem in our discipline, is probably due to a poor diagnosis that causes the operational researchers to work with irrelevant problems. The next step in the O.R. work will usually be to seek for a kind of "rational" framework for action, i.e., to seek for compatibility of the cores of an action programme. Implementation of an action programme in an organization or in society usually leads to the discussion about "power". Studies of rationality, power and their interrelations have been central themes of controversies in the social and human sciences. The main question is: Does power dominates reationality, or does rationality dominates power? The answer to this question will have different scientific, ethical and political consequences in the practice of O.R. This is of special interest for critical O.R., since all action-orientated methodologies aim at changes and, thus, alter the status quo in some manner. This may sometimes involve conflicts and thereby the exercise of power. Further discussions can be found in Mingers [4].

- (iii) **O.R. as science of the concrete**, this implies a new conceptualization of O.R. as a scientific discipline. The views of O.R. presented in (i) and in (ii) imply that our discipline cannot be taught, practiced, or scientifically developed in a merely abstract and universal way. O.R. is like sex, the best way to learn about it, is by doing it. Presenting O.R. just by its tools and methods is a reductionism which results in making O.R. workers either applied mathematicians, applied computer scientists or applied economists. This does not mean that action programmes are of a theoretical nature, but it means that theory, proposals and action are un-separable antities related to a concrete situation. Abstract and universal studies of decision-making processes are merely focusing on idea, plan, formal politics and formal rationality, a science of the concrete (as O.R.) has to include reality, implementation, real politics and real rationality.

This will also permit us to introduce experience and intuition as possible elements in an O.R. study together with analytical rational methods, see further Section 4. The idea of science of the concrete stems from the work of the sociologist Foucault [9], [10], and his studies of rationality and power, which present a better perspective for a scientific discussion of O.R. Further research in this direction is needed.

- (iv) **O.R. as education**, here I want to emphasize that the practice of O.R. and education may be regarded as similar activities. In the case of education, it is important to emphasize that it is concerned primarily with the development of wisdom rather than cleverness, see further Section 4. On the other hand, O.R. is

done for people, by people and is generally about people. Men are not machines and the structure of reality is dynamic and evolving not static. It is in this connection important to emphasize that man can participate in the design of his future rather than being a passive victim of it and recognizing the full richness of actions instead of attending to confine value to that which can be measured in financial terms. And, just as the principles of education put more emphasis on developing the learners ability to learn rather than the teacher's ability to teach, O.R. should seek to encourage those who have a problem to solve it themselves.

This is my first effort to formulate such a framework for O.R. but much more work has to be done to improve its contents, a text-book along with these lines is badly needed in O.R.

#### 4. Teaching and Learning

"The transmission of facts" is commonly how education is regarded and teaching is practiced. I believe that this is a very limited and inappropriate view in what concerns our discipline. Education concerns the development of **wisdom**, and wisdom is not equivalent to **cleverness**. Cleverness may be attained by the adoption of facts, but wisdom cannot be. The resolution of problems often calls for radical changes, then the innovation of a radical order calls, not for cleverness, but for wisdom, namely, for those who are more interested in what they cannot see than those whose vision is limited by their present knowledge.

This intent of broadening perception is an essential part of education and its achievements mark wisdom. Thus, education can be understood to mean guiding the student out of himself, beyond his existing perception of the world towards a wider view, towards greater wisdom. However, education in O.R. (as well as other disciplines), as is widely practiced, appears to aim at quite the opposite. It seems to drive the teacher's view of the world into the student, thus narrowing his perception. A broadening of perception allows an individual to know more and to understand better. Thus, it can be said that the wise man is not so much the man who **knows** as the man who **can know**. In other words, an individual's consciousness must **a priori** be capable of knowing before there can be knowledge.

How can wisdom be encouraged in an individual? Clearly, wisdom will be enhanced by other means than those which give rise to simply cleverness. Whereas cleverness may be developed by **teaching**, wisdom is a consequence of **learning**.

It is therefore necessary to distinguish between teaching and learning. In referring to teaching, the focus is placed upon the teacher who teaches. In seeking education from this perspective, the student is regarded as a secondary, passive figure. Discussion of education will then concern matters such as teaching methods, teaching aids and even teaching machines. By contrast, when discussing learning, it is the student who is the central and principal figure. As the person who is learning, he or she must be seen to assume an active role in the process, and will be termed the **learner**. The person conducting the learning process will be referred to as an

**educator.** The educator then becomes the person who assists (supervises, see the next section) learning.

The Burgoyne et al [11] model of learning differentiates between three types of learning and is based on a model of a man who has an inner world of ideas, schema, meanings, skills, etc. and an outer world in which he is operating. Behavior in the outer world is based on inner world meanings, constructions, etc. Three types of learning are then possible: (i) Reception of input e.g. lectures, demonstrations, (ii) Discovery which involves action and feedback (e.g. doing experiments), and (iii) Reflection, which is totally an "inner world" experience, e.g. accommodating some ideas into our existing schema which may require some adjustments, in order to achieve a reasonable fit, see further Section 6.

A central question in connection with teaching/education in O.R. that cannot be answered by Burgoyne et al's model is: How do human beings learn? or more precisely: Which role does context play in human being's knowledge and skills? or How does man achieve knowledge and skills? There are many schools and theories in this area, but I have chosen Dreyfus and Dreyfus (D&D) model [12] because it provides an understanding of the relationship between knowledge and context and, more specifically, because it provides an answer to the question: To what extent knowledge about human activities can be context-free or not? This is of central importance for our discussion on education in O.R.

Table 3 shows the five steps in a human being's learning process according to the D&D model. In this model there is a **qualitative** jump from the first three to the fourth and fifth level. This jump reflects the fact that rule-based thinking is disregarded as the most important basis for action. Instead experience and intuition is taking its place, i.e. logic based action is replaced by situational based action. D&D in the above mentioned reference provide an extensive empirical documentation for the validity of their model. Their main conclusion is that intelligent action consists of something more than calculate analytical rationality.

Skill level	Characteristics
1 . Novice	Context-free elements and rules as basis for action.
2 . Advanced beginner	Experience based, situational elements supplements context-free elements and rules.
3 . Competent	Goal and plan is selected consciously and carefully with the purpose of reducing complexity. These goal and plan are used to structure a large quantity of both situational and context-free information. The competent persons are involved in the results of their actions with their own person.
4 . Proficient	Intuitive problem identification and intuitive selection of goal and plan based on a perspective of experience. The intuitive selection is evaluated analytically before action.
5 . Expert	Intuitive, holistic and synchronous identification of problem, goal, plan, decision and action. Fluent, un-forced performance that is not interrupted by analytical reflections.

Table 3 - Five steps in a human being's learning process [8]



Intuition is the ability to use earlier experiences and to recognize analogies between these experiences and the new situation. Intuition is internalized through reflection, is a part of a human being. Research has shown that intuition cannot be externalized in rules and explanations. This externalization is only possible for analytical rationality and those skills that characterize the lower levels of the learning process.

As conventional rationality is not the ultimate goal for the human being's learning process. This does not mean that necessarily we will end in irrationality. D&D introduces the concept of **arational**. Arational behavior denotes the context-dependent action, without any consciously analytical disintegration and re-combination of situations in partial elements and evaluation after context-free rules. What is of central relevance to O.R. is that this model places context, that is the concrete, central in the production of knowledge and skills.

The quantitative jump has radical consequences, since it shows the limitations of any analytical rational conceptualization of people's activity, as is the case of traditional or practical O.R. The interesting thing in this model is that it shows how to overcome this limitation by explicit incorporation of those characteristics that describe the upper levels of the learning process. It supplements analysis and rationality with: Context, praxis, trial-and-error, experience, common sense, intuition.

### 5. Supervision and O.R.

It is my experience that "supervision" is one of the best ways to provide education in O.R., our aim is not only to teach but also to educate following the ideas presented in the last section. In addition, supervision is a suitable way of supporting the learning process of the learner. In this section, I will give a short presentation of supervision. Interested readers may consult [13] where an extended discussion is presented and suitable references are listed.

Supervision is an activity which has been practiced in several consulting oriented professions, such as: social work, teaching, education, therapy and psychiatry. To my knowledge, supervision has never been systematically discussed within the fields of Operations Research and Systems Analysis.

Let us first give the generally accepted definition of supervision: **Supervision** is an interactive process among professionals, where more experienced professionals help less experienced colleagues to integrate professional knowledge and practical attitudes, so that they become better equipped to carry out the theory and methods of their profession. This process is formulated as a **time limited contract**. It has a supporting function and it is primarily oriented towards professionals matters.

This definition of supervision is an abstract and universal one. It is quite similar to the definitions found in most books dealing with supervision. Actually, it is rather difficult to define an interactive social process between two colleagues essaying professional development. Two supervision activities, even within the same profession, might be quite different from a holistic viewpoint.

In a supervision process we find elements of teaching, instruction and advising, consultation and psychotherapy. However, supervision cannot be reduced to any of these single aspects. The supervision is neither a teacher nor an instructor. Supervision is based on a contract between two persons of the same profession to run during a certain time period and involves regular meetings. Supervision should not be reduced to consultation, where a specialist is called to give some expert advice, not necessarily being part of the whole interactive process. While therapy is dealing with the private sphere, supervision is dealing with the professional area. In this connection it is important to emphasize that opposite to a therapist the supervisor has not any specific educational background. A supervisor is usually a person with some years of practical experiences and teaching activities especially interested in the theories and methods and the social role of his/her profession. The best basis for becoming a supervisor is to have undergone a supervision process himself.

Recently, I have realized that during my more than 20 years of teaching activities at the Technical University of Denmark I have been practicing some of the principles of supervision - without knowing the existence of such a concept. I have supervised many M.Sc. students. They were supposed to find "the decision problem", to establish contact with the users, and to carry out the use of the systems approach. I was not directly involved in this process. Having more experience and being professionally interested in theory and methods my job was not that of an adviser but rather that of a supervisor. In most cases, excellent work and experiences have been the result of these projects.

My interest in working more systematically with supervision grew up while teaching a course on "OR and Public Planning". I wanted to introduce some problem structuring methods. Here I found that the traditional teaching activities practiced at DTU (blackboard oriented, teacher controlled and one-way communication) was not suitable for getting acquainted with the new "soft" methods. I applied some of the ideas of supervision since I myself was not very familiar with these new problem structuring methods. The students were divided into different groups, each group working on a specific method and they were supposed to find a case study. The groups and I had a common professional interest in "learning by doing" and in "creating by criticizing". After these experiences, I am convinced that the ideas and practices of supervision can be of great inspiration in the process of developing alternative learning processes in O.R. This will be of central relevance in connection with O.R. education in the Third World. To avoid any form of blind transfer of O.R.-technology, political and cultural aspects have to be taken into consideration.

Supervision can also be of crucial relevance to consulting firms where new colleagues, who have recently left the university life and now meet the real world, have to be channelled through the goals and practices of the organization and its customers. In addition, senior colleagues and leaders will also need supervision in order to avoid professional stagnation, undigested bad experiences and to enhance the art of self-criticism. Obviously in the short run, supervision will

be an unprofitable activity for the consulting firm in question, but in the long-run supervision will pay since the quality of the delivered product and the social relations in the firm will be improved. Another area where supervision has an important role to play is related to the use of problem structuring method in practice. Here a "facilitator" plays a central role in this social process embedded with many individual interactions at the social-psychological and psychological levels. In such a situation supervision is a must for both beginners and experienced facilitators.

Moreover, an important issue will be to evolve the traditional consulting-oriented approach of O.R. to a supervision-oriented approach, where the users are supervised, thus enabling them to develop their own professional capabilities to solve their own decision problems. These ideas fit very well into the ideas behind the development of Decision Support Systems. These ideas fit also very well into the suggestion that the role of operational researchers is to help other persons to solve their problems themselves, i.e. O.R. as education.

## 6. Supervision and Learning Processes

There is one limitation in the D&D model: it does not describe the process of how a learner moves from one level to another. In this connection it is interesting to incorporate Stoltenberg and Delworth (S&D) [14] model, where in a structural form describes the development of a supervised therapist from an un-experienced and insecure therapist to an experienced one with his own professional identity.

In this model, the development of a person being supervised is understood to be a dialectical process, i.e. the individual incorporates new knowledge in a constant interaction with the outside world, where new experiences are transformed, in an **adaptation** process (assimilative and accommodative interaction), to cognitive structures that are incorporated to the already existing structures.

**Assimilation** is the process where old experiences are in focus and new ones are only used as far as it is possible to incorporate them in a consistent way into earlier experiences. The outside world is adapted to the individual.

**Accommodation** is the process of what is in focus is the adaptation of the individual to the outside world. Old experiences are considered and adapted to the new experience.

The S&D model works with three levels of development, and a final integrating step, also called the master step only reached by very few. Remark the analogy to the five levels of the D&D model. In addition, S&B conceptualizes the three steps as irreversible, structural changes, where regressions of short duration to earlier steps can be possible (when confronted with new and different situations).

Furthermore, this model contains at each level three basic development structures:

- (i) **Consciousness about one-self and others**, for instance, the unexperienced facilitator overfocusing on himself is conditioned by the insecurity of being confronted with a new situation.

- (ii) **Motivation**, for instance motivation can vary very much for the experienced O.R. man (at level 2) where some abilities are already achieved, but where meeting with new challenges and thereby meeting his own limitations, can reduce momentarily his motivation.
- (iii) **Autonomy**, for instance seeing, in relation to the O.R. worker in level 2, already mentioned in (ii), a conflict between autonomy and dependence of the supervisor.

S&D work with eight specific "areas of skills" that are relevant for psychotherapists. These areas of skills are developed at different and individual rates within each level and at each new level at a deeper level of knowledge.

In general you may say that the O.R. process is unknown and provokes anxiety to unexperienced operational researchers. This means that the person begin supervised will primarily focus on himself. Therefore, the emphatic understanding of the actors in "poor" and the person supervised will primarily seek to conceptualize the actors from an already acquired knowledge. In other words, the assimilation process is emphasized at the expense of the accommodation process.

It is also important to point out the young O.R. worker's motivation, a motivation that is usually based on idealized ideas on "helping others" or being "as good as possible" rather than a real understanding of the situation. It is my experience that the beginner, the non-experienced O.R. worker is **strongly dependent** on the supervisor. In this phase the supervisor will often be idealized, and his actions and suggestions are essayed to be imitated rather than to be understood. Here, the actors will be understood assimilatively while the supervisor will be used accommodatively. In such situations it is very important, at supervision at level one, to create a supporting, fixed structured room with a minimum use of confrontations and intensively use of feed-back of positive signals.

At level two the O.R. workers can to a larger extent understand the actors both cognitively and emotionally. The focus is moved from himself to the actors and, therefore, it is possible to develop a bigger emphatic understanding of the actor's individualities and peculiarities.

To be able to use the S&D model in O.R. we have to identify the specific "areas of skill" of our discipline (in the case of a therapist these are: intervention skills, evaluation techniques, interpersonal evaluations, ability to image the actor's situation, individual differences, theoretical orientation, goal and plan for treatment, and professional ethics). In addition, we have to describe the process of moving from one area of skills to another at different development levels. To be able to understand the dynamics of the learning processes in O.R., thus enabling us to give a better and relevant education in our discipline, research work is badly needed.

## 7. Final Remarks

Departing from the question how to teach/learn O.R., we have been dealing with other central question about the nature of O.R., what is education, learning processes, and the role of supervision in O.R.

We have shown that O.R. can be conceptualized in different ways, depending on whether we are focusing on tools and techniques, on methodological aspects, or on the social praxis of O.R. workers. We have also noted that in the presentation of our discipline the themes of tools, models and techniques are overemphasized. This is even more so in the so-called "soft methods" and "critical methods" of O.R., see for instance [15] [16], while the aspects of praxis and reality are considered in a very superfluous way. O.R. is not (mathematical) modelling although sometimes it might be a good idea to use models in connection with the solution of a real-life problem situation. Here it is important to enhance that many decision problems in our societies are solved in a reasonable way without any use of O.R. or other related sister disciplines. O.R. suitably conceptualized might play a central role in society, as was the case in the Second World War. Finally, note to put things into perspective that the development of Society can be going on without any use of O.R., either technical, practical or critical, or in the spite of the actual use of O.R.: if the social context does not allocate a central role to O.R., it will not have any. In this connection research work is needed to find out which kind of O.R. is needed by different organizations (employers, trade unions, environmental organizations, etc.), by the state (central, province, municipality) and by the public in general (community O.R.). In this connection a central question is: How does O.R. enhance democracy and participation in decision-making?

If O.R. is going to have some future we have to develop it by emphasizing four central aspects: O.R. as a social process, O.R. as action to change, O.R. as science of the concrete, and O.R. as education. This is one of the main messages of this paper. More research devoted to a more precise description of these aspects of O.R. is badly needed. Suitable textbooks emphasizing these four dimensions are badly needed to replace the already mathematically orientated textbooks.

Concern about education in O.R. as well as O.R. as education demands a better understanding of the way human beings learn. Our studies have shown the limitation of the analytical rational way of problem solving and the need to introduce in our education in O.R. as well as in O.R. education, intuition, and experience as essential elements in sound problem-solving. This also points to the fact that if O.R. has to have a future it does not have to be reduced to analytical problem-solving using models, but it has to be enhanced to participative problem-solving including dialogue, intuition, experience, common sense, ethics and social responsibility.

Finally, we recommend supervision as a suitable way of learning and offering education in this enhanced vision of O.R. Students and young professionals should be supervised in

connection with real-life problem-solving. Teachers can also be supervised by experienced O.R. workers in connection with concrete projects. Research work is needed in order to understand the process of going from a novice O.R. worker level to an expert level.

### 8. References

- [1] Dando, M.R. and Benett, P.G.A. (1981), A Kuhnian Crisis in Management Science?, *J.Operational Res. Soc.* 32, 91-103.
- [2] Gault, R. (1984), O.R. as Education, *European Journal of Operational Research* 16, 293-307.
- [3] Boothroyd, H., *Articulate Intervention*, Taylor and Francis, London, 1978.
- [4] Mingers, J. (1992), Technical, Practical and Critical O.R. - Past, Present and Future, in Alvelsson, M. and Willmott, H. , *Critical Management Studies*, Sage, London.
- [5] Habermas, J. (1972), *Knowledge and Human Interest*, Heinemann, London.
- [6] Habermas, J. (1974), *Theory and Practice*, Heinemann, London.
- [7] Miser, H.J. and Quade, E.S., *Handbook of Systems Analysis*, Vol. I (1985), Vol. II (1988), John Wiley, Chichester, UK.
- [8] Flyvbjerg, B. (1991), *Rationalitet og Magt*, Bind I: Det Konkrete Videnskab, Akademisk Forlag, Copenhagen, (in Danish).
- [9] Foucault, M. (1972), *The Archeology of Knowledge*, Pantheon, New York.
- [10] Foucault, M. (1973), *The Order of Things: An Archeology of the Human Sciences*, Vintage, New York.
- [11] Burgoyne, J. et al. (1978), *Self Development Theory and Application for Practitioners*, Association of Management Teachers.
- [12] Dreyfus, H.L. and Dreyfus, S.E. (1986), *Mind over Machine - The Power of Human Intuition and Expertise in the Era of the Computer*, Basil Blackwell, Oxford, UK.
- [13] Vidal, R.V.V. (1993), *Supervision and O.R.*, IMSOR, The Technical University of Denmark, (Manus) p.2.
- [14] Stoltenberg, C.D. and Delworth, U. (1987), *Supervising Counselors and Therapists: A Development Approach*, Jossey-Bass, London.
- [15] Jackson, M.C. (1991), *Systems Methodology for the Management Sciences*, Plenum Press, New York.
- [16] Flood, R.L. and Carson, E.R. (1988), *Dealing with Complexity*, Plenum Press, New York.

## INSTRUÇÕES AOS AUTORES

Os autores que desejem submeter um artigo à Investigação Operacional devem enviar três cópias desse trabalho para:

Prof. Joaquim J. Júdice  
Departamento de Matemática  
Universidade de Coimbra  
3000 Coimbra, Portugal

Os artigos devem ser escritos em Português ou Inglês. A primeira página deve conter a seguinte informação:

- Título do artigo
- Autor(es) e instituição(ões) a que pertence(em)
- Abstract (em inglês)
- Resumo
- Keywords (em inglês)
- Título abreviado

As figuras devem aparecer em separado de modo a poderem ser reduzidas e fotocopiadas. As referências devem ser numeradas consecutivamente e aparecer por ordem alfabética de acordo com os seguintes formatos:

Artigos: autor(es), título, título e número da revista (livro com indicação dos editores), ano, páginas.

Livros: autor(es), título, editorial, local de edição, ano.

**Fotografia, Montagem  
Impressão e Acabamentos**  
Tip. Nocamil  
COIMBRA



## ÍNDICE

C. Romero, Multiple criteria decision making in forestry planning: a critical review .....	3
C. Bana e Costa e J. C. Vansnick, Uma nova abordagem ao problema da construção de uma função de valor cardinal: MACBETH .....	15
A. S. Vilaça e R. C. Oliveira, Um modelo de regressão logística aplicada ao estudo do insucesso escolar.....	37
J. L. Borges e J. F. Cunha, Sistema de apoio à geração de escalas de pessoal no planeamento operacional de sistemas de transportes colectivos .....	53
J. F. Gonçalves e J. J. M. Mendes, Regra de prioridade dinâmica para sequenciamento de operações .....	69
M. A. Matos e M. T. Ponce de Leão, Planeamento de redes de distribuição com injeções incertas .....	81
R. V. V. Vidal, How to teach/learn OR .....	97



Associação Portuguesa para o Desenvolvimento  
da Investigação Operacional

CÉSUR - Instituto Superior Técnico - Avenida Rovisco Pais  
1000 Lisboa - Telef. 80 74 55