
LocRout DSS

**Sistema de Apoio à Decisão para
Localização de Equipamentos e
Geração de Percursos de Transporte
com Abordagem Multicritério**

MANUAL DE APOIO AO UTILIZADOR

João M. Coutinho Rodrigues

Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra

ÍNDICE

CAP 1	Localização e Transporte - Uma Formulação	1
	1.1 Introdução	2
	1.2 Um Problema Típico.....	3
	1.3 O Modelo Matemático	4
CAP 2	Arquitectura do Sistema de Apoio à Decisão	9
	2.1 As Componentes do Sistema	10
	2.2 Os Dados.....	11
	2.3 A Edição da Rede	12
	2.4 A Geração de Soluções	13
	2.5 Apresentação das Soluções	14
	2.6 Gestão das Soluções Geradas	15
	2.7 Comparação de Soluções	16
	2.8 Guia para Novas Pesquisas	17
	2.8.1 Conceitos Gerais sobre Guia de Pesquisa	17
	2.8.2 Um Método Gráfico de Guia (BAGAL).....	18
CAP 3	Demonstração do Funcionamento do SAD	21
	3.1 Definição do Problema do Exemplo	22
	3.2 Abrir e Visualizar os Dados do Problema.....	23
	3.3 Inicialização da Pesquisa	25
	3.4 Visualização das Soluções	26
	3.5 Comparação das Cinco Primeiras Soluções.....	28
	3.6 Pesquisa de Nova Solução - 5 Objectivos com Pesos Iguais	31
	3.7 Pesquisa de Nova Solução - 5 Pesos Iguais e Restrições Adicionais.....	34
	3.7.1 Comparação das Soluções no Espaço dos Objectivos.....	37
	3.8 Pesquisa de Nova Solução - Programação por Metas.....	38

ÍNDICE

	3.9 Edição da Rede	39
CAP 4	REFERÊNCIA	41
	4.1 Características Gerais	42
	4.2 O Menu “File”	43
	4.2.1 Open... ..	43
	4.2.2 Close Network.....	43
	4.2.3 Close Window.....	43
	4.2.4 Save Network	43
	4.2.5 Save Network As... ..	43
	4.2.6 Save	44
	4.2.7 Save As... ..	44
	4.2.8 Page Setup... ..	44
	4.2.9 Print... ..	44
	4.2.10 Revert Network.....	44
	4.2.11 Quit.....	44
	4.3 O Menu “Solutions”.....	45
	4.3.1 Initialize Search.....	45
	4.3.2 Continue Search... ..	45
	4.3.3 Solution Basket.....	45
	4.4 O Menu “Graphics”	46
	4.4.1 Node Coordin.	46
	4.4.2 Node Names	46
	4.4.3 Node Popul.	46
	4.4.4 Node Waste.....	46
	4.4.5 Arc Names.....	46
	4.4.6 Arc Lengths	47
	4.4.7 Arc Populations	47
	4.4.8 Spider Web	47
	4.4.9 Shortest Paths... ..	47
	4.4.10 Min. Span. Tree	47
	4.4.11 Scale... ..	47
	4.4.12 Usar Fundo	47
	4.5 Exemplo	48
	4.5.1 Abrir um problema	48

ÍNDICE

4.5.2 Inicializar o cálculo de soluções.....	49
4.5.3 Comparar as Primeiras Soluções.....	54
4.5.4 Calcular Soluções Adicionais.....	55
4.5.4.1 Cálculo com Soma Pesada de Objectivos.....	55
4.5.4.2 Cálculo com Soma Pesada de Objectivos e Restrições Adicionais.....	56
4.5.4.3 Cálculo com Programação por Metas.....	58
4.5.5 Comparar Soluções.....	60
4.5.6 Editar a Rede.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Esquema do BAGAL	20
Figura 2	Comando para abrir um problema	23
Figura 3	Diálogo para abrir o problema	23
Figura 4	Janela com rede representativa do problema	24
Figura 5	Comando para inicializar a pesquisa de soluções	25
Figura 6	As primeiras cinco soluções representadas em janelas	27
Figura 7	Comando para visualizar Solution Basket	28
Figura 8	Soluções representadas em gráficos de colunas com 2 em “Value Paths”	29
Figura 9	Visualização de gráficos com soluções ordenadas	30
Figura 10	Diálogo para especificação de parâmetros em nova pesquisa	31
Figura 11	Diálogo para especificação de parâmetros em nova pesquisa	31
Figura 12	Diálogo para nova pesquisa com 3 objectivos activos	32
Figura 13	Diálogo para nova pesquisa com 5 pesos iguais	32
Figura 14	Solução na rede, obtida com pesos iguais para os cinco objectivos	33
Figura 15	Diálogo para nova pesquisa com 5 pesos iguais e 2 restrições adicionais	35
Figura 16	Solução na rede, obtida com pesos iguais para os 5 objectivos e uma restrição adicional	36
Figura 17	Gráficos com todas as soluções em colunas e comparação de 2 soluções particulares	37
Figura 18	Menu File	43
Figura 19	Menu Solutions	45
Figura 20	Menu Graphics	46
Figura 21	Comando Open no Menu File	48
Figura 22	Diálogo para abrir um ficheiro	48
Figura 23	Janela com problema	49
Figura 24	Janelas com as cinco primeiras soluções	50
Figura 25	Activando a janela da solução 2 com o rato	51
Figura 26	As janelas com as cinco soluções iniciais, todas visíveis	52
Figura 27	Comando para visualizar Solution Basket	54
Figura 28	Soluções representadas em gráficos de colunas e “Value Paths”	54
Figura 29	Visualização de gráficos com soluções ordenadas	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 30	Diálogo para introdução de parâmetros de cálculo (5 pesos iguais)	56
Figura 31	Solução 6, obtida com cinco pesos iguais	56
Figura 32	Diálogo para introdução de parâmetros de cálculo (pesos e restrições adicionais)	57
Figura 33	Solução 7, obtida com cinco pesos iguais e 2 restrições adicionais	58
Figura 34	Diálogo para nova pesquisa com metas impostas para 3 objectivos	59
Figura 35	Solução na rede, obtida com pesquisa através de programação por metas	60
Figura 36	Comparação de soluções: colunas e “Value Paths” ou teia ou GRADS	62
Figura 37	Diálogo para edição de parâmetros de uma arco	63
Figura 38	Diálogo para edição de parâmetros de uma nó	64

CAP 1

Localização e Transporte - Uma Formulação

1.1 Introdução

As questões de localização de equipamentos e de circulação de veículos envolvem geralmente problemas de decisão onde interessa a consideração de diversos critérios em simultâneo (abordagens multicritério). As técnicas de programação matemática, nomeadamente programação inteira e mista, têm sido utilizadas com sucesso no tratamento de problemas de localização de equipamentos, circulação de veículos, e em problemas mistos de localização e circulação.

Contudo, o uso de tais técnicas em problemas multicritério apresenta dificuldades acrescidas que têm basicamente três origens como se expõe a seguir. Em primeiro lugar estes problemas são em geral de muito difícil resolução, mesmo para problemas com um só critério. Isto é, pertencem em geral à classe de problemas usualmente classificados como “NP-Hard”. Em segundo lugar, não existe em geral uma única solução que seja ótima para todos os objetivos em simultâneo. Nestes casos, o conceito de solução ótima é substituído pelo de solução eficiente, também designada por não-dominada, de Pareto ou não-inferior (uma solução domina outra se for melhor que ela em pelo menos um critério, igualando-a nos restantes). Nestes casos, o número de soluções eficientes pode crescer exponencialmente com o tamanho do problema, como está provado mesmo em casos de circulação de veículos bastante mais simples. De acordo com o exposto, a determinação de todo o conjunto de soluções eficientes, corresponderia à resolução de um enorme número de problemas que são, individualmente, intratáveis sob o ponto de vista computacional. Em terceiro lugar, ao crescer o número de critérios, torna-se cada vez mais difícil para um agente de decisão comparar as diversas soluções entre si, considerando os compromissos entre os diversos critérios.

Neste contexto foi desenvolvido um sistema de apoio à decisão interativo espacial de modo a poder permitir lidar com as dificuldades acabadas de enunciar, tentando reduzi-las.

1.2 Um Problema Típico

O desenvolvimento deste sistema foi motivado pela necessidade da análise, levando em consideração vários objectivos em simultâneo, de um problema particular: o transporte de materiais perigosos e a localização das respectivas centrais de tratamento considerando vários critérios. No entanto, o sistema é suficientemente geral para poder tratar outros problemas de localização de equipamentos e afectação das quantidades a transportar a uma rede viária, em que se pretenda uma abordagem multicritério. Como incorpora um modelo matemático especialmente desenvolvido para o tratamento do problema particular referido, as particularidades do modelo serão a seguir expostas tendo em conta aquela realidade.

Resumidamente, supondo dados

- i) um conjunto de fontes geradoras de materiais perigosos a tratar;
- ii) um conjunto de locais potenciais para as estações de tratamento;
- iii) uma rede viária para o transporte;
- iv) custos conhecidos (transporte, instalação e exploração de centrais) e
- v) populações em risco (provocado pelo transporte e centrais),

o problema consiste em determinar a localização a adoptar para as centrais, os caminhos a usar no transporte das fontes para as centrais e as quantidades a transportar por cada caminho. Para tal pretende-se considerar em simultâneo a minimização de cinco objectivos:

- i) risco total associado ao transporte;
- ii) risco máximo imposto a cada pessoa associado ao transporte;
- iii) risco total associado às centrais de tratamento;
- iv) risco máximo imposto a cada pessoa associado ao tratamento;
- v) custo total (transportes, instalação de centrais e tratamento).

1.3 O Modelo Matemático

Dada uma rede $G=(N,A)$ composta por N nodos, m arcos (i,j) ligando os nodos i e j , e dois parâmetros não negativos a_{ij} e c_{ij} associados a cada arco (i,j) , o problema usado como exemplo pode ser formulado como um problema de programação linear mista como se segue:

$$\text{Min} \quad \sum_i \sum_j a_{ij} X_{ij} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$\text{Min} \quad \sum_{j \in F} a_j \left(\sum_i X_{ij} \right) \quad \text{Eq. (2)}$$

$$\text{Min} \quad M \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\text{Min} \quad P \quad \text{Eq. (4)}$$

$$\text{Min} \quad \sum_i \sum_j C_{ij} X_{ij} + \sum_j \left(F_j Y_j + h_j \sum_i X_{ij} \right) \quad \text{Eq. (5)}$$

sujeito a:

$$\sum_j X_{ij} - \sum_j X_{ji} = W_i \quad \forall i \in S \quad \text{Eq. (6)}$$

$$\sum_i X_{ij} - \sum_i X_{ji} \leq K_j Y_j \quad \forall j \in F \quad \text{Eq. (7)}$$

$$\sum_i X_{il} - \sum_j X_{lj} = 0 \quad \forall l \notin S \cup F \quad \text{Eq. (8)}$$

$$\sum_i X_{ij} - \sum_i X_{ji} \geq 0 \quad \forall j \in F \quad \text{Eq. (9)}$$

$$\sum_j X_{lj} \leq M \quad \forall l \notin S \cup F \quad \text{Eq. (10)}$$

$$X_{ij} \leq M \quad \forall (i,j) \text{ with } i \text{ and } j \in S \cup F \quad \text{Eq. (11)}$$

1.3 O Modelo Matemático

$$\sum_i X_{ij} - \sum_i X_{ji} \leq P \quad \forall j \in F \quad \text{Eq. (12)}$$

$$Y_j \in \{0, 1\} \quad \text{Eq. (13)}$$

No modelo as variáveis de decisão são:

X_{ij} = quantidade de resíduos transportados do nó i para o nó j

$Y_j = 1$ se é aberta uma central em j , $Y_j = 0$ em caso contrário

e os parâmetros são:

W_i = quantidade de resíduos produzidos em i num dado período

a_{ij} = população existente numa distância inferior a D unidades à volta do arco (i,j)

a_j = população total num raio de D unidades à volta do nodo j

C_{ij} = custo unitário de transporte associado ao arco (i,j)

F_j = custo fixo p/ abrir uma central em j

h_j = custo variável unitário para a central aberta em j

K_j = máxima capacidade de uma central situada em j

F = conjunto de potenciais locais para centrais

S = conjunto das fontes de materiais perigosos

As funções objectivo têm o seguinte significado:

- i) equação (1) - minimização do risco total associado ao transporte, medido em termos de população potencialmente afectada (ao longo das ligações);

- ii) equação (2) - minimização do risco total P associado às centrais de tratamento, medido em termos de população potencialmente afectada (num dado raio à volta da central);
- iii) equação (3) - minimização do risco máximo M imposto a cada pessoa associado ao transporte, medido em termos de quantidade de resíduos que no transporte podem potencialmente afectar um indivíduo;
- iv) equação (4) - minimização do risco máximo imposto a cada pessoa associado ao tratamento, medido em termos de quantidade de resíduos que ao serem tratados numa central podem potencialmente afectar um indivíduo;
- v) equação (5) - minimização do custo total, resultante da soma dos custos de transporte e de tratamento sendo este a soma dos custos de instalação das centrais e da sua exploração.

Os dois primeiros objectivos exprimem a necessidade de minimização do risco. Os terceiro e quarto objectivos exprimem a preocupação com as questões de equidade. O quinto objectivo exprime a necessidade de minimização do custo total da solução.

Quanto às restrições, o respectivo significado é o seguinte:

- i) equação (6) - todos os resíduos produzidos em cada nó devem sair a fim de serem tratados;
- ii) equação (7) - a quantidade de resíduos transportados para uma central aberta não deve ultrapassar a respectiva capacidade;
- iii) equação (8) - a quantidade de resíduos que entra num nó que não é uma fonte nem uma central deve igualar a quantidade que sai (conservação do fluxo);
- iv) equação (9) - permite que materiais possam ser transportados através de um nó onde é aberta uma central (sem lá ficarem retidos);
- v) equação (10) e equação (11)- traduzem uma limitação ao risco máximo M imposto a cada pessoa associado ao transporte;

1.3 O Modelo Matemático

- vi) equação (12) - traduz uma limitação ao risco máximo P imposto a cada pessoa associado a qualquer central;
- vii) equação (13) - traduz a natureza binária das variáveis associadas às centrais de tratamento.

CAP 2

Arquitectura do Sistema de Apoio à Decisão

2.1 As Componentes do Sistema

O sistema de apoio à decisão interactivo espacial foi concebido de modo a poder ser usado para o tipo de problemas em estudo, incorporando componentes para:

- i) Armazenamento e leitura de dados da rede
- ii) Edição da rede
- iii) Geração de soluções
- iv) Apresentação de soluções
- v) Gestão de soluções geradas
- vi) Comparação de soluções
- vii) Guia para novas pesquisas.

2.2 Os Dados

Os dados típicos de um problema de transporte e localização englobam informação referente às fontes e aos locais candidatos à localização de equipamentos de recolha/armazenamento/processamento, e informação relativa a atributos da rede viária. Um exemplo típico é o caso do transporte e localização de estações de tratamento de resíduos perigosos para o qual o sistema foi originalmente desenvolvido. Nesses problemas, os parâmetros envolvidos incluem:

- i) o conjunto de potenciais locais para centrais, F
- ii) o conjunto das fontes de materiais perigosos, S
- iii) a quantidade total de materiais produzidos em cada fonte i num dado período, (W_i) .
- iv) a população total numa distância de D unidades à volta do arco (i,j) , a_{ij}
- v) a população total num raio de D unidades à volta de cada nodo j , a_j
- vi) o custo unitário de transporte associado a cada arco (i,j) , C_{ij}
- vii) o custo fixo p/ abrir uma central em cada local candidato j , F_j
- viii) o custo variável unitário para a central aberta em j , h_j
- ix) a máxima capacidade de uma central situada em j , K_j

2.3 A Edição da Rede

Foram desenvolvidos procedimentos que permitem ao agente de decisão, de uma maneira fácil, alterar a estrutura da rede (adicionando/eliminando nós ou arcos) e alterar parâmetros associados aos nós e aos arcos da rede, usando o rato e introduzindo valores em caixas de diálogo.

Podem ser deslocados facilmente nós da rede, quer através da actuação do rato sobre eles (arraste), quer alterando as respectivas coordenadas em diálogos apropriados.

Um arco novo pode também ser criado com o rato, arrastando este com o botão premido entre os dois nós extremos.

Qualquer subgrafo pode ser facilmente seleccionado por arraste do rato entre dois pontos que delimitam a diagonal de um rectângulo que intersecta esse subgrafo.

Os parâmetros associados a um nó ou arco podem ser facilmente editados através de diálogos visualizados após dois *clicks* do rato sobre o objecto em questão (ver secção 4.5.6, página 63, figura 37 e figura 38).

2.4 A Geração de Soluções

O gerador de soluções pode ser visto como a parte do sistema que permite determinar novas soluções a requisito do agente de decisão.

Os problemas a resolver, como já foi referido, são de natureza altamente complexa sob o ponto de vista computacional. O gerador utiliza técnicas de programação linear mista recorrendo à técnica “branch and bound”.

No entanto, todo o processo de geração do modelo a partir dos dados associados a uma rede e o complexo procedimento matemático de obtenção de uma solução, foram programados de modo a serem completamente transparentes para o utilizador. Assim, a pedido do agente de decisão (escolhendo um comando, com o rato, num menu), é desencadeado, em bastidor, todo o processo de geração do modelo matemático seguido da resolução e, no fim, da apresentação da solução no ecrã numa nova janela.

2.5 Apresentação das Soluções

Esta componente pode ser considerada os olhos do sistema. Logo que uma nova solução é determinada pelo gerador de soluções (que, como foi referido, opera em bastidor), ela é imediatamente apresentada numa nova janela. Esta apresentação usa representações gráficas sob a forma de rede onde são devidamente assinaladas as centrais abertas e os caminhos a seguir pelos materiais perigosos, tal como as respectivas quantidades em circulação em cada ligação. Pode ser designada como representação no “espaço da decisão”, pois tem, no fundo, a ver com uma representação espacial, um “mapa” representativo de elementos físicos ligados ao problema. Permitem responder visualmente a questões como

- qual o “aspecto” da solução no terreno?
- que equipamentos serão implantados e qual o nível de serviço que lhes é atribuído?
- quais as estradas usadas no transporte e quais as quantidades a transportar por cada uma delas?

Outras formas de apresentação foram também implementadas, nomeadamente para facilitarem operações de comparação como se referirá a seguir. Usam-se aqui valores atingidos pelas soluções para os diversos objectivos usados na análise, pelo que se pode designar por representações no “espaço dos objectivos”.

2.6 Gestão das Soluções Geradas

As soluções, à medida que vão sendo geradas, vão sendo internamente armazenadas em estruturas de dados especialmente concebidas para o efeito. Esta componente pode ser vista como a “memória” do sistema.

O utilizador pode sempre decidir quais as soluções previamente calculadas que pretende manter no sistema. Pode fechar janelas com representações gráficas (sob a forma de rede) de soluções que não pretenda mais no ecrã, e pode eliminar permanentemente soluções.

As funções de “memória” são usadas a um nível bastante mais extenso, pois permitem ao agente de decisão tomar características de uma solução conhecida, nomeadamente parâmetros usados para o seu cálculo, e prosseguir a pesquisa de novas soluções fazendo usar esses parâmetros modificados.

2.7 Comparação de Soluções

Todas as soluções previamente calculadas podem ser comparadas através de meios gráficos especialmente desenvolvidos para o efeito.

Foi já referida a grande dificuldade sentida por um agente de decisão ao pretender efectuar comparações entre diversas alternativas quando estão em jogo múltiplos critérios na avaliação, como é o caso dos problemas em estudo. Essas dificuldades aumentam rapidamente com o número de soluções e o número de critérios.

De modo a poderem ser aumentadas as capacidades cognitivas do agente de decisão, foram implementados diversos tipos de representação gráfica adequados ao efeito, como gráficos de barras, gráficos de linhas unindo pontos (“value paths”), diagramas em teia (“spider webs”) e mesmo outras formas onde uma representação multidimensional é traduzida no plano através de um par de eixos coordenados representativos de dois critérios (escolhidos pelo utilizador) sendo os restantes critérios representados em cada ponto por eixos suplementares com direcções adequadas (“GRADS”).

O intuito é sempre permitir uma visualização conveniente das alternativas já conhecidas e, também com base nisso, facilitar a definição de parâmetros para a pesquisa de novas soluções eficientes.

2.8 Guia para Novas Pesquisas

2.8.1 Conceitos Gerais sobre Guia de Pesquisa

Esta componente do sistema tem a ver com a abordagem não normativa que, em geral, é seguida neste tipo de problemas de decisão multicritério. O agente de decisão deve poder efectuar experimentações, orientando a pesquisa para regiões do espaço das soluções que lhe pareçam mais promissoras ou interessantes.

Um problema fundamental que aqui se coloca, em geral, tem a ver com o conhecimento do espaço das soluções: podendo o número destas crescer exponencialmente com o tamanho do problema e sendo um problema altamente complexo a determinação de cada solução, como já se referiu, não é realista pretender conhecer exhaustivamente todo esse conjunto de soluções. Daí que o sistema proporcione, à partida, dois processos de inicialização da determinação de soluções:

- i) determinação de cinco soluções que correspondem à minimização de cada uma das funções objectivo em separado, ou
- ii) determinação de onze soluções que correspondem às cinco anteriores mais seis calculadas com convenientes somas pesadas das cinco funções objectivo, de modo a proporcionar o conhecimento de um conjunto de partida mais alargado e convenientemente disseminado no espaço das soluções, de acordo com o método designado por “Interval Criterion Weights” (ICW) devido a Steuer.

A partir dessas soluções iniciais o agente de decisão poderá dirigir a pesquisa para regiões que mais lhe interesse explorar, quer manipulando o conjunto de pesos a usar, quer impondo restrições adicionais ao problema (o que permite, nomeadamente, encontrar soluções existentes nos chamados intervalos de dualidade e que o método da pura soma pesada não permitiria encontrar), quer ainda permitindo a especificação de metas a atingir na pesquisa.

Todo o procedimento de interacção com o utilizador para manipulação de parâmetros a usar na nova pesquisa foi implementado através do uso de caixas de diálogo contendo controlos que podem ser manipulados graficamente com o rato e mesmo representações gráficas adequadas. A visualização quer dos parâmetros em definição quer de soluções previamente calculadas e dos respectivos parâmetros. O agente de decisão pode mesmo iniciar um processo de pesquisa usando como dados iniciais os parâmetros utilizados para calcular uma solução já conhecida, ou seja, usando uma solução “guia”, e alterando depois esses parâmetros numa caixa de diálogo.

2.8.2 Um Método Gráfico de Guia (BAGAL)

Daremos especial importância à descrição de um método gráfico concebido e implementado neste sistema com a função de guiar o agente de decisão na pesquisa de novas soluções. Chamámos a essa técnica “BAGAL” (da terminologia inglesa “Best AGAINst the Least”).

Os agentes de decisão usam frequentemente pontos ou valores de referência ao tomarem decisões. Conceitos como o de “solução ideal” (isto é, a melhor possível) ou de “solução anti-ideal” (isto é, a pior) chegaram mesmo a ser propostas como pontos de referência em problemas de decisão multicritério. O método gráfico BAGAL baseia-se precisamente nestes dois conceitos, combinando-os sobre uma representação gráfica, semelhante a uma teia, método este proposto por outros autores em questões de visualização simultânea dos valores assumidos por vários critérios. Num sistema interactivo, como é o que implementámos, este método pode efectivamente facilitar novas pesquisas e ajudar a visualizar soluções existentes.

A chamada “solução ideal” em geral não existe na prática quando existem vários critérios em conflito. Pode, contudo, ser imaginada como uma solução hipotética em que o valor de cada função objectivo é o melhor possível, ou seja, o que é obtido minimizando isoladamente essa função objectivo.

No nosso problema, existindo 5 objectivos, a solução ideal ficará conhecida resolvendo cinco problemas em que se minimiza isoladamente uma única função objectivo diferente em cada um deles. Assim, cada uma dessas soluções fornece o mínimo valor possível para um dos objectivos, e a solução ideal poderá ser construída com os valores desse cinco óptimos.

Como primeira aproximação da solução anti-ideal, poderá ser construída uma solução escolhendo, naquelas cinco soluções, o pior valor (ou seja, o máximo) para cada um dos objectivos. Sempre que seja calculada uma nova solução, se algum dos objectivos tiver um valor pior que o correspondente valor na aproximação da solução anti-ideal, esta será actualizada com novo valor para esse objectivo.

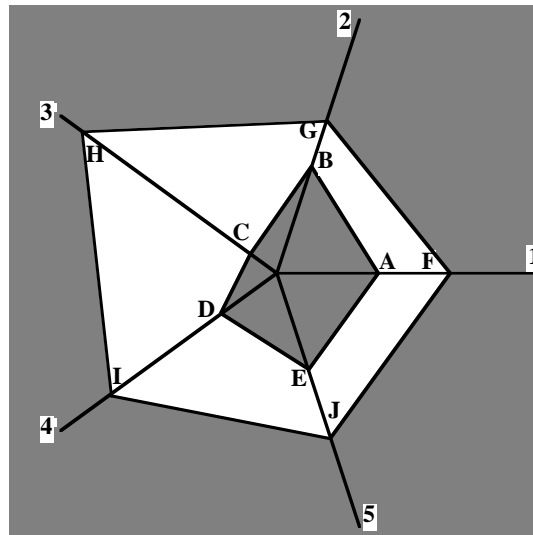
Para exemplificar o método, considere-se o gráfico BAGAL com cinco objectivos representado na figura 1. Os pontos A, B, C, D e E representam os valores mínimos atingíveis por cada um dos cinco objectivos, ou seja, a solução ideal, delimitando a fronteira interna do BAGAL. Os pontos F, G, H, I e J representam a melhor aproximação conhecida para a solução anti-ideal.

O polígono sombreado A, B, C, D e E representa a zona de soluções inadmissíveis para o problema, pois nunca poderá ser calculada nenhuma solução que, para qualquer objectivo, apresente um valor inferior ao do respectivo valor na solução ideal. A fronteira externa do BAGAL corresponde à melhor aproximação conhecida para a solução anti-ideal. Qualquer solução que caia no espaço situado no exterior desta fronteira será certamente dominada por alguma solução previamente determinada e que estará situada entre as duas fronteiras do BAGAL (isto é, a área não sombreada na figura 1).

Demonstrar-se-á adiante a utilidade do BAGAL nas suas funções de guia para a pesquisa de novas soluções.

Figura 1

Esquema do BAGAL



CAP 3

Demonstração do Funcionamento do SAD

Far-se-á nesta secção a demonstração do SADIE implementado, através de um exemplo ilustrativo. Dado tratar-se de um protótipo científico e ser muito importante a sua divulgação internacional, todos os menus e diálogos foram implementados em inglês.

3.1 Definição do Problema do Exemplo

Consideremos um problema em que existem diversos pontos geradores de materiais perigosos que necessitam de tratamento especial em centrais adequadas, sendo conhecidas as quantidades geradas em cada uma dessas fontes. Considere-se a existência de 4 locais candidatos à localização dessas centrais, sendo conhecidas as capacidades máximas admissíveis para cada um desses locais, bem como os respectivos custos de instalação e custos unitários de exploração. A rede viária existente é também conhecida tal como os custos unitários de transporte em cada troço e as populações onde se farão incidir riscos quer devido ao transporte, quer devido à operação das centrais.

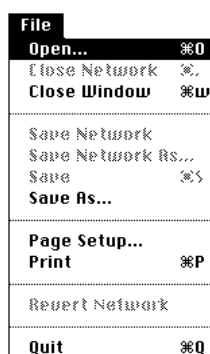
Este problema está armazenado num ficheiro, no disco do computador. Depois de se abrir o programa, deverá proceder-se à leitura deste ficheiro como se descreve a seguir.

3.2 Abrir e Visualizar os Dados do Problema

Para abrir o problema deverá ser escolhido o comando *Open* no menu *File* (figura 2).

Figura 2

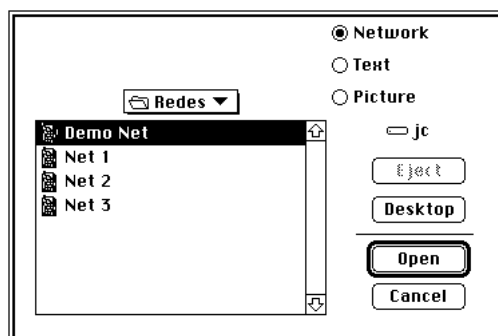
Comando para abrir um problema



Será visualizado um diálogo (figura 3) onde, com o rato, bastará escolher o ficheiro a abrir posicionando o cursor sobre o nome deste e pressionando o botão do rato duas vezes seguidas em sucessão rápida (referir-nos-emos futuramente a este tipo de procedimento, habitual no uso de sistemas informáticos, através da designação “dois clics”).

Figura 3

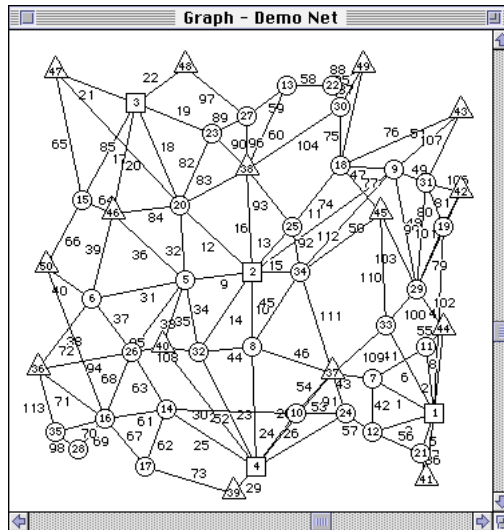
Diálogo para abrir o problema



Os dados são lidos do ficheiro e a correspondente representação gráfica é apresentada numa nova janela (figura 4).

Figura 4

Janela com rede representativa do problema



Nesta representação existem nós representado com três formas diferentes: triângulos para as fontes geradoras de materiais perigosos, quadrados para os locais candidatos à localização de centrais e círculos para os restantes.

3.3 Inicialização da Pesquisa

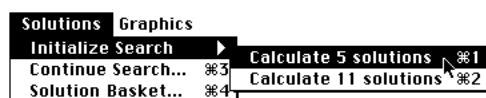
O processo de inicialização da pesquisa permite calcular um número mínimo de soluções de partida. Podem ser cinco ou onze, conforme se pretenda calcular as soluções que minimizam cada um dos objectivos separadamente ou se pretenda uma amostra mais alargada em que, além daquelas cinco são determinadas mais seis soluções com somas pesadas dos cinco objectivos convenientemente escolhidas de acordo com o método ICW.

Para aceder a qualquer uma das duas possibilidades descritas, bastará escolher o correspondente sub-comando do comando *Initialize Search* no menu *Solutions*.

Escolhendo o sub-comando *Calculate 5 solutions*, é desencadeado o processo de cálculo das cinco primeiras soluções.

Figura 5

Comando para inicializar a pesquisa de soluções



Todo o processo de geração do modelo matemático e da obtenção da solução, se desenrola em bastidor sendo, portanto, completamente transparente para o utilizador., como já foi referido na secção 2.4, página 12. Os resultados são apresentados por via gráfica (como se descreve a seguir).

3.4 Visualização das Soluções

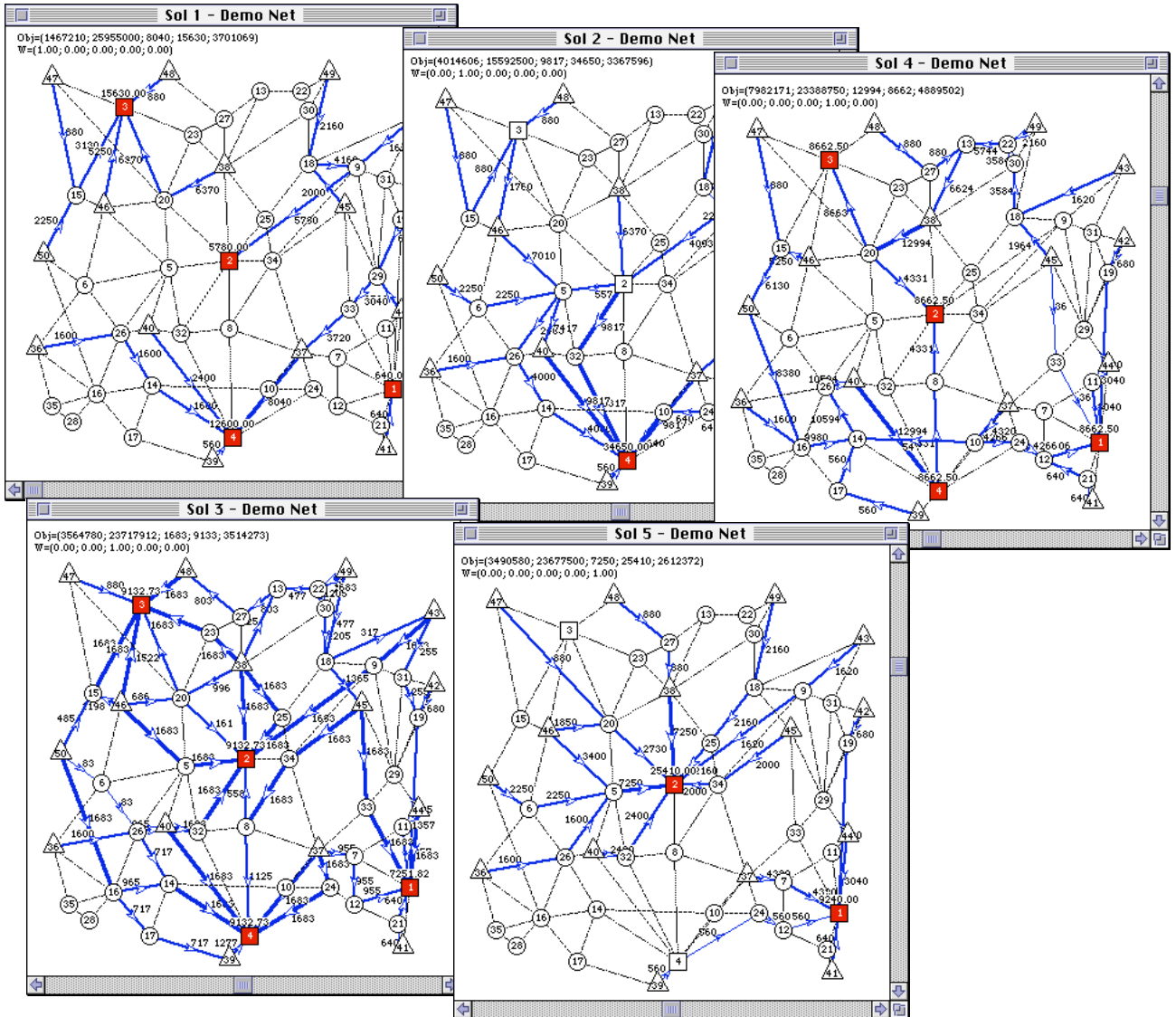
À medida que vão sendo calculadas, cada uma das cinco soluções, é apresentada em nova janela onde se podem ver assinalados os nós com centrais abertas, os caminhos usados e as quantidades a transportar em cada troço do caminho (as espessuras dos arcos são proporcionais aos volumes que por eles circulam no transporte). Os valores de cada um dos cinco

3.4 Visualização das Soluções

objectivos também aparecem explícitos na janela, bem como alguns parâmetros usados no cálculo, como os pesos usados.

Figura 6

As primeiras cinco soluções representadas em janelas



3.5 Comparação das Cinco Primeiras Soluções

As soluções já calculadas podem ser comparadas através de representações gráficas desenvolvidas para esse efeito.

Figura 7

Comando para visualizar Solution Basket



Assim, escolhendo o comando *Solutions Basket...* no menu *Solutions* (figura 7), é visualizada uma janela especial onde, em cinco conjuntos de gráficos de colunas aparecem representados os valores dos objectivos para cada uma das soluções calculadas (figura 8).

Marcando os quadrados existentes na zona inferior esquerda desta janela, sob cada conjunto vertical de colunas correspondente a uma das soluções, poderá obter-se uma visualização dessas soluções na parte direita (na figura 8 seguinte estão marcadas as soluções 1 e 3). Essa representação particular tem a finalidade de facilitar ao agente de decisão a comparação entre alternativas e baseia-se em três tipos possíveis de gráficos a escolher pelo utilizador:

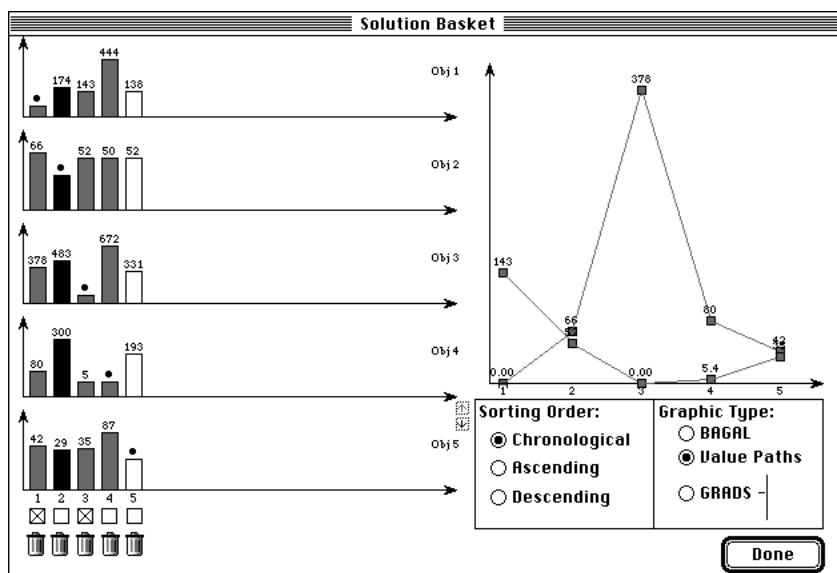
- i) representação de gráficos de linhas unindo pontos (“value paths”),
- ii) diagramas em teia (“spider webs”) e
- iii) uma representação multidimensional traduzida no plano através de um par de eixos coordenados representativos de dois critérios (escolhidos pelo utilizador) sendo os restantes critérios representados em

3.5 Comparação das Cinco Primeiras Soluções

cada ponto por eixos suplementares com direcções adequadas (“GRADS”).

Figura 8

Soluções representadas em gráficos de colunas com 2 em “Value Paths”



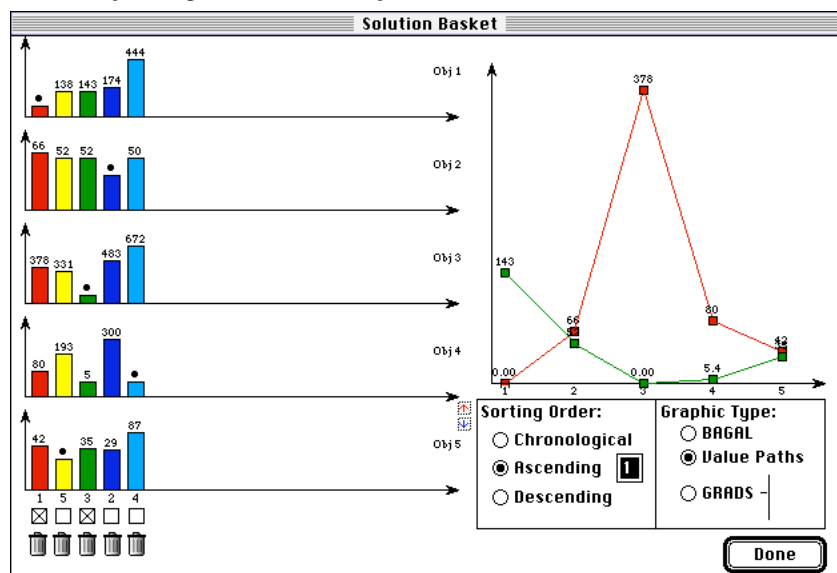
Nas representações gráficas aparece explícito o valor numérico atingido por cada alternativa para cada objectivo. Para facilitar comparações, o valor usado é a diferença obtida acima do valor mínimo do objectivo correspondente e é apresentado em percentagem (daquele valor mínimo).

As colunas podem aparecer representando as soluções pela respectiva ordem cronológica ou ordenadas por ordem crescente ou decrescente dos valores de qualquer um dos objectivos. Por exemplo, na figura 9 as colu-

nas aparecem ordenadas pela ordem crescente dos valores obtidos para o objectivo 1 nas cinco soluções representadas.

Figura 9


Visualização de gráficos com soluções ordenadas



Para, na parte direita da janela, aparecerem as duas seleccionadas representadas com BAGAL ou com GRADS, bastaria o utilizador pressionar o botão correspondente.

Todas estas possibilidades de representação gráfica foram implementadas para tornar mais fácil o trabalho de comparação de compromissos entre as alternativas em estudo. Assim, ser-lhe-á mais fácil identificar e eliminar soluções menos interessantes e mesmo identificar soluções que possam servir de guia para novas pesquisas.

Mais detalhes técnicos sobre estes aspectos podem ser vistos no artigo escrito para submeter a revista científica internacional e que se apresenta em Anexo.

Nesta janela pode também o utilizador eliminar soluções para o que basta premir com o rato o ícone  que existe ao fundo de cada solução (zona das colunas).

3.6 Pesquisa de Nova Solução - 5 Objectivos com Pesos Iguais

Para se calcular uma nova solução, deverá ser escolhido o comando *Continue Search...* no menu *Solutions* (figura 10).

Figura 10

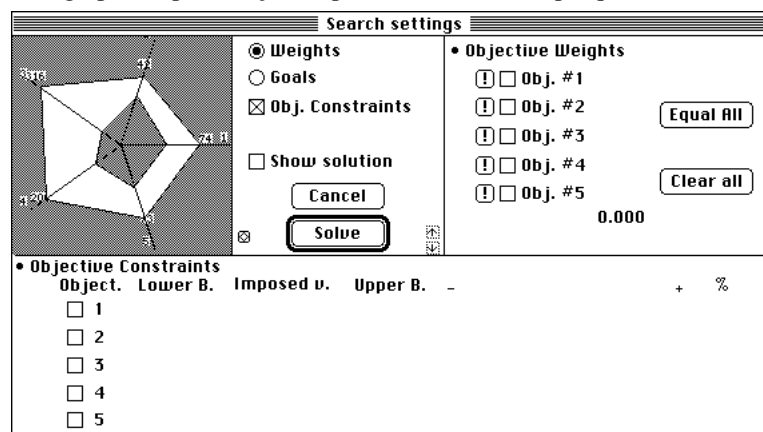
Diálogo para especificação de parâmetros em nova pesquisa



É então visualizada uma janela de diálogo onde podem ser introduzidos os parâmetros para a pesquisa de uma nova solução (figura 11). Os pesos são precisamente um tipo de parâmetros a introduzir para usar na pesquisa uma soma pesada de todos ou de alguns dos objectivos (aqueles que se activarem para o efeito neste diálogo).

Figura 11

Diálogo para especificação de parâmetros em nova pesquisa

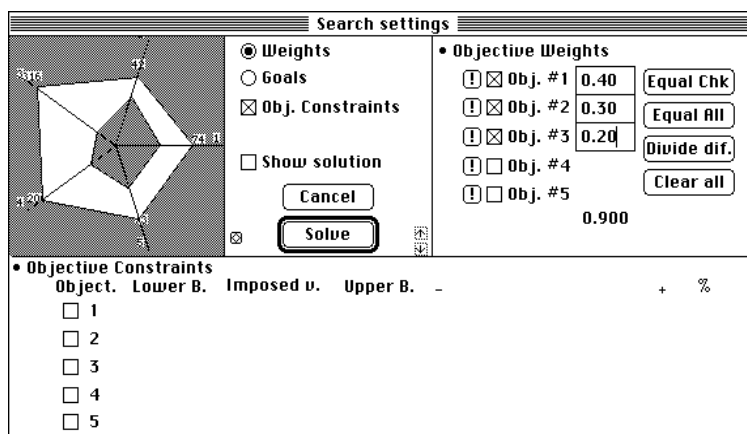


Botões especiais permitem, ao serem premidos, activar rapidamente apenas um dos objectivos desactivando todos os outros. Só em situações particulares ficam visíveis alguns botões deste diálogo, com o intuito de facilitarem a entrada de valores correctos. Assim, se, por exemplo, forem activados apenas alguns dos objectivos, é mostrado um botão que permite igualar os pesos desses objectivos (figura 12). Se o conjunto de pesos já introduzidos tem uma soma diferente da unidade, torna-se visível um

botão que permite dividir, pelos critérios activos no diálogo, a diferença em relação à unidade (figura 12).

Figura 12

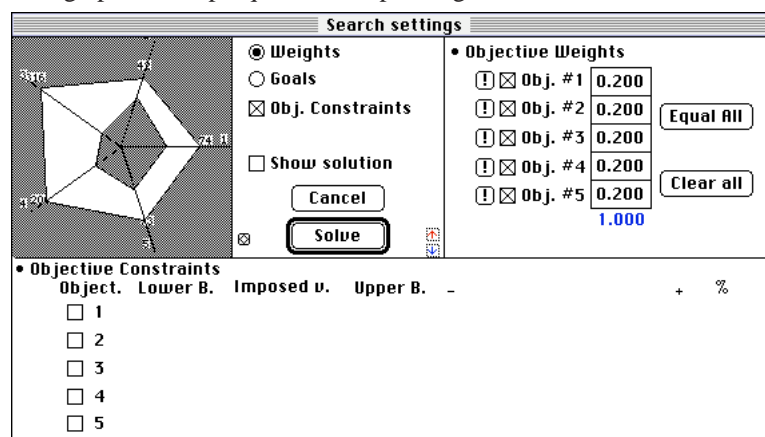
Diálogo para nova pesquisa com 3 objectivos activos



Supondo que neste caso se pretende pedir ao sistema o cálculo de uma nova solução que minimize a soma pesada, com pesos iguais, das cinco funções objectivo do problema (definidas no modelo matemático apresentado na secção 1.3, página 4 pelas expressões Eq. 1 a Eq. 5), a configuração dos parâmetros seria a apresentada na figura 13.

Figura 13

Diálogo para nova pesquisa com 5 pesos iguais



A configuração representada na figura 13 levará ao cálculo de uma solução em que será usada uma soma pesada dos cinco objectivos. Os pesos

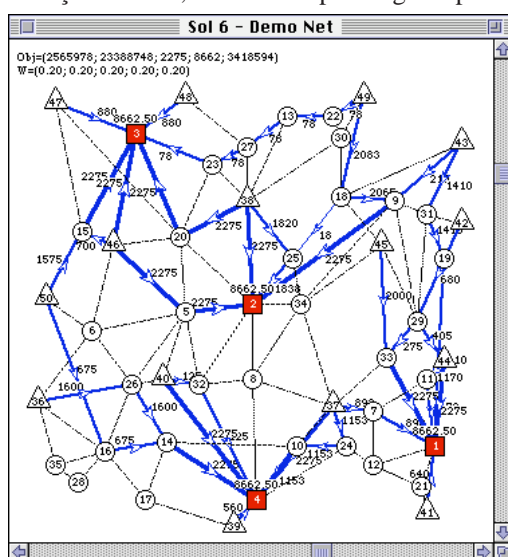
3.6 Pesquisa de Nova Solução - 5 Objectivos com Pesos Iguais

aí especificados são de 20% para cada um dos objectivos, mas poderiam ter outros valores quaisquer (com a soma igual a 100%).

Depois de ser premido o botão “Solve” neste diálogo, é gerado o modelo matemático e determinada a solução do problema, que é apresentada sob a forma de rede numa nova janela (figura 14).

Figura 14

Solução na rede, obtida com pesos iguais para os cinco objectivos



Nesta janela podem observar-se, de entre os locais candidatos, os sítios escolhidos para abrir centrais, o nível de serviço atribuído a cada uma e os fluxos de materiais a serem transportados através de cada ligação da rede, de modo a encaminhar a totalidade dos resíduos transportados desde as diversas fontes até às centrais abertas. Os valores atingidos para cada um dos cinco objectivos também aparecem na janela, bem como os valores dos pesos usados no cálculo.

3.7 Pesquisa de Nova Solução - 5 Pesos Iguais e Restrições Adicionais

Suponhamos que, depois de observados os valores atingidos para os cinco critérios na última solução e, em particular os valores para o primeiro deles ($Z_1=2\ 565\ 978$), o agente de decisão pretende, usando ainda um conjunto de cinco pesos iguais, pesquisar a eventual existência de alguma solução em que os valor para aquele objectivo não ultrapassasse 2500000 (número de pessoas em risco provocado pelo transporte).

Para se pesquisar a existência de uma tal solução, deverá ser escolhido o comando *Continue Search...* no menu **Solutions** (figura 10). É então visualizado o diálogo para introdução dos parâmetros de pesquisa de uma nova solução (figura 15). Aí bastará premir o botão “Equal All” para se colocarem todos os pesos iguais a 20%.

Depois, para introduzir a restrição adicional no modelo, como esta se refere ao objectivo 1, teria de ser activada essa restrição no diálogo marcando o quadrado respectivo. A partir dessa altura, passariam a ser visíveis vários novos elementos no diálogo referentes a esse objectivo:

- i) os valores dos limites inferior (“Lower Bound”, o melhor valor possível) e superior (“Upper Bound”, o pior valor das soluções calculadas);
- ii) uma caixa para editar o valor da restrição adicional na escala usada na definição do objectivo;
- iii) uma caixa para editar o valor da restrição adicional em percentagem;
- iv) um controlo deslizante, directamente manipulável com o rato.

O valor de uma restrição adicional pode ser definido de uma das seguintes formas:

- i) numericamente em valor medido na escala do objectivo (escrevendo-o na caixa de editar referida em ii),
- ii) em percentagem (escrevendo-a na caixa de editar referida em iii),

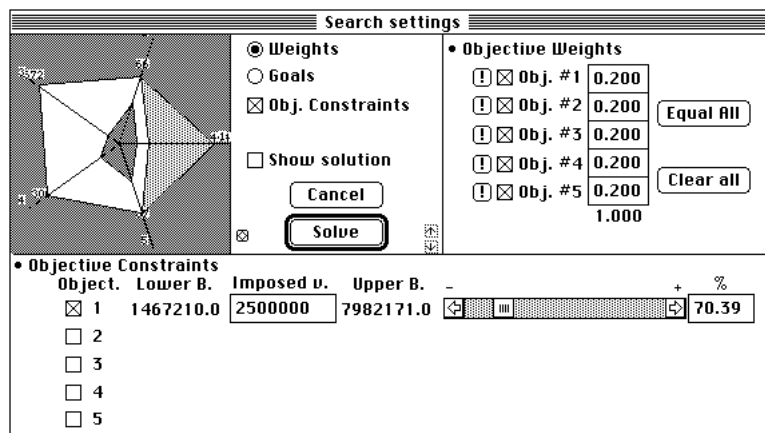
3.7 Pesquisa de Nova Solução - 5 Pesos Iguais e Restrições Adicionais

iii) movendo com o rato o controlo deslizante (referido em iv).

Em qualquer dos casos, a representação gráfica da restrição adicional é automaticamente apresentada na teia situada no canto superior esquerdo do diálogo. Ao mover o controlo deslizante com o rato entre o seu extremo esquerdo e direito, isso corresponde a fazer variar o valor da restrição adicional entre o limite inferior e o superior - nesse caso os correspondentes valores numéricos são apresentados tanto na caixa de edição em valor à escala, como em percentagem (e a representação gráfica na teia também é actualizada).

Figura 15

Diálogo para nova pesquisa com 5 pesos iguais e 2 restrições adicionais

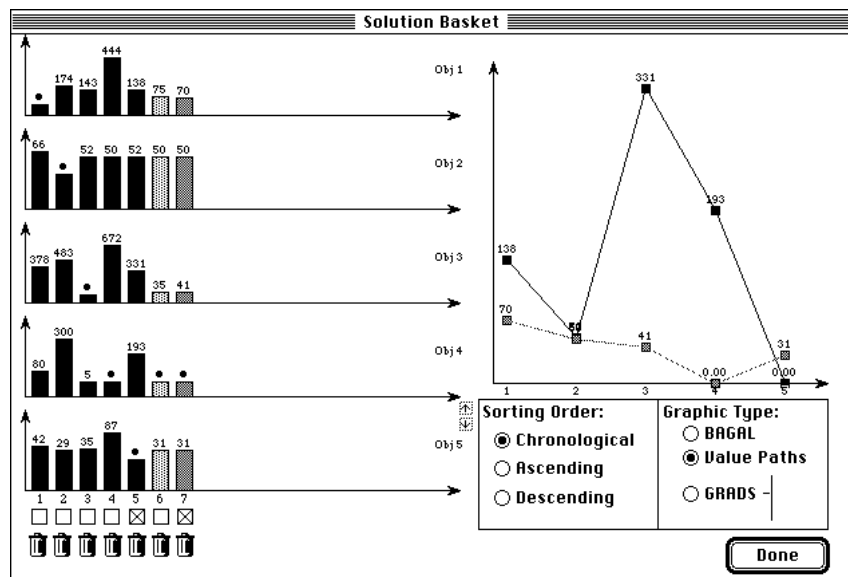


3.7 Pesquisa de Nova Solução - 5 Pesos Iguais e Restrições Adicionais

Basket” (escolhendo o comando *Solutions Basket...* no menu *Solutions*, figura 7). Na figura 17 aparece essa janela com todas as soluções já calculadas representadas em colunas, em três situações correspondentes à visualização, por três diferentes meios gráficos, de duas soluções particulares.

Figura 17

Gráficos com todas as soluções em colunas e comparação de 2 soluções particulares



Na secção 4.5.5, página 58 são apresentadas outras possibilidades gráficas de comparação.

3.8 Pesquisa de Nova Solução - Programação por Metas

Como possibilidade adicional, o sistema permite ainda que o agente de decisão possa efectuar pesquisas através da imposição de metas a atingir para um ou mais objectivos e de prioridades para essas metas. Para tal bastará seguir o procedimento descrito na secção 4.5.4.3, página 56. É de salientar, contudo, que este tipo de pesquisa, ao contrário dos anteriormente descritos, não garante à partida que encontrará como resultado uma solução não dominada.

3.9 Edição da Rede

A rede pode ser alterada na janela que contém o grafo representativo do problema. Podem ser editados os parâmetros relacionados com qualquer nó ou arco. Para tal basta fazer dois *clicks* sobre o nó ou arco pretendido para que um diálogo contendo os respectivos parâmetros seja visualizado, onde os mesmos podem ser alterados. Para eliminar um arco ou um nó, basta marcá-lo fazendo sobre ele um *click* com o rato e, a seguir, premir a tecla *Delete*.

CAP 4

REFERÊNCIA

4.1 Características Gerais

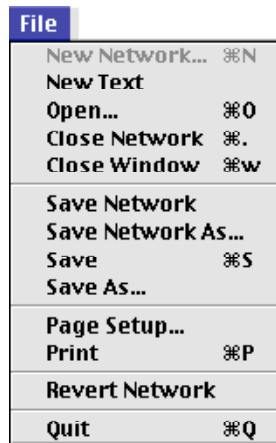
O programa consiste na implementação do sistema de apoio à decisão descrito no Capítulo 1, tanto no que corresponde ao modelo matemático como ao interface de comunicação homem-máquina. Foi desenvolvido para correr especificamente em computadores *Macintosh* ou *PowerMacintosh*. Baseia-se no uso de menus de desenrolar, janelas, diálogos assíncronos e gestão de eventos gerados pelo teclado e pelo rato.

4.2 O Menu “File”

Este menu disponibiliza comandos, nomeadamente, para abrir, fechar e imprimir problemas ou o conteúdo de janelas existentes no ecrã.

Figura 18

Menu File



Os comandos deste menu são os seguintes:

4.2.1 Open...

Permite abrir um problema a partir de um ficheiro;

4.2.2 Close Network...

Fecha o problema que estiver aberto.

4.2.3 Close Window...

Fecha a janela activa.

4.2.4 Save Network

Guarda o problema aberto.

4.2.5 Save Network As...

Guarda o problema aberto permitindo alterar-lhe o nome.

4.2.6 Save

Guarda o conteúdo da janela activa (por exemplo uma figura representando uma solução);

4.2.7 Save As...

Guarda o conteúdo da janela activa (por exemplo uma figura representando uma solução) permitindo alterar-lhe o nome corrente;

4.2.8 Page Setup...

Permite escolher o tipo de página a usar na impressora.

4.2.9 Print...

Imprime o conteúdo da janela activa.

4.2.10 Revert Network

Recupera os dados originais do problema, depois de terem sido alterados.

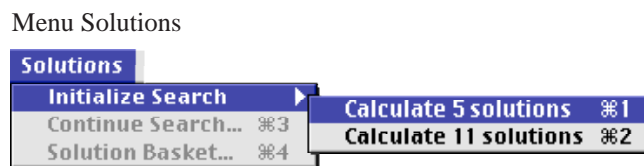
4.2.11 Quit

Comando para sair o programa.

4.3 O Menu “Solutions”

Este menu disponibiliza comandos para inicializar o cálculo de soluções para o problema, calcular soluções adicionais através da especificação de parâmetros em diálogo adequado para o efeito, ou comparar soluções no espaço dos objectivos usando representações gráficas.

Figura 19



Os comandos deste menu são os seguintes:

4.3.1 Initialize Search

Seleccionado na figura, permite inicializar a pesquisa de soluções tendo dois subcomandos, um permite calcular cinco soluções iniciais (cada uma minimizando um dos objectivos isoladamente) e o outro onze (pelo método ICW devido a Steuer);

4.3.2 Continue Search...

Permite continuar a pesquisa, isto é, calcular uma nova solução de acordo com parâmetros especificados num diálogo que é visualizado logo que se escolhe este comando;

4.3.3 Solution Basket...

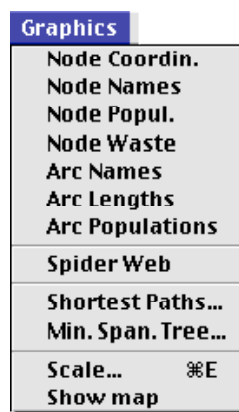
Permite efectuar comparações entre soluções numa janela própria que é aberta logo que se escolhe este comando.

4.4 O Menu “Graphics”

Este menu disponibiliza comandos para gerar gráficos com dados e resultados e ainda para apresentar representações gráficas com os resultados de problemas auxiliares envolvendo redes, como a árvore de caminhos mais curtos ou a árvore abrangente de custo mínimo.

Figura 20

Menu Graphics



4.4.1 Node Coordin.

Permite obter uma janela com a rede e as coordenadas de cada nó.

4.4.2 Node Names

Permite obter uma janela com a rede e as designações de cada nó.

4.4.3 Node Popul.

Permite obter uma janela com a rede e as populações associadas a cada nó.

4.4.4 Node Waste

Permite obter uma janela com a rede e a quantidade de resíduos associada a cada nó.

4.4.5 Arc Names

Permite obter uma janela com a rede e as designações de cada arco.

4.4.6 Arc Lengths

Permite obter uma janela com a rede e os comprimentos de cada arco.

4.4.7 Arc Populations

Permite obter uma janela com a rede e as populações associadas a cada arco.

4.4.8 Spider Web

Permite obter uma janela com a spider web representando as soluções já encontradas.

4.4.9 Shortest Paths...

Permite obter uma representação gráfica da árvore de caminhos mais curtos com raiz em qualquer nó (a indicar) para a rede em análise.

4.4.10 Min. Span. Tree

Permite obter uma representação gráfica da árvore geradora mínima para a rede em análise.

4.4.11 Scale...

Mostra um diálogo permitindo ao utilizador mudar a escala da representação gráfica da rede.

4.4.12 Usar Fundo

Este comando permite mostrar ou esconder uma imagem digitalizada (mapa) como fundo da rede.

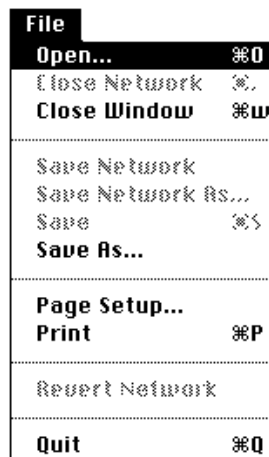
4.5 Exemplo

4.5.1 Abrir um problema

- i) Escolher o comando *Open...* no menu *File*.

Figura 21

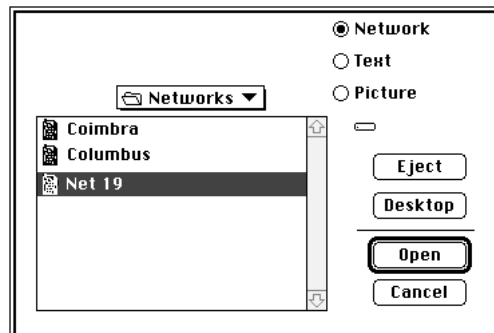
Comando Open no Menu File



- ii) Escolher o ficheiro desejado no diálogo e premir o botão “Open”.

Figura 22

Diálogo para abrir um ficheiro

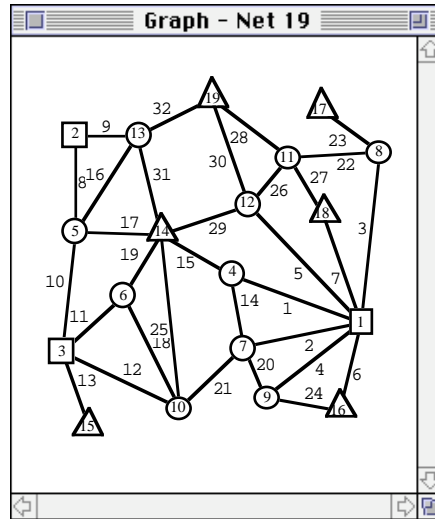


4.5 Exemplo

O problema é representado sob a forma de rede numa janela.

Figura 23

Janela com problema



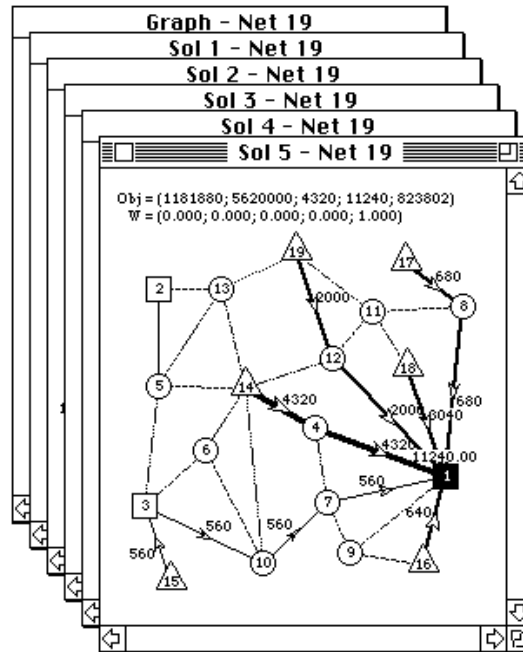
4.5.2 Inicializar o cálculo de soluções

Escolher o comando desejado no menu *Solutions*. Para inicializar com cinco soluções (minimizando cada um dos cinco objectivos separadamente) escolher, no comando *Initialize Search*, o subcomando *Calculate*

5 solutions. As cinco soluções vão sendo apresentadas em novas janelas à medida que são calculadas.

Figura 24

Janelas com as cinco primeiras soluções

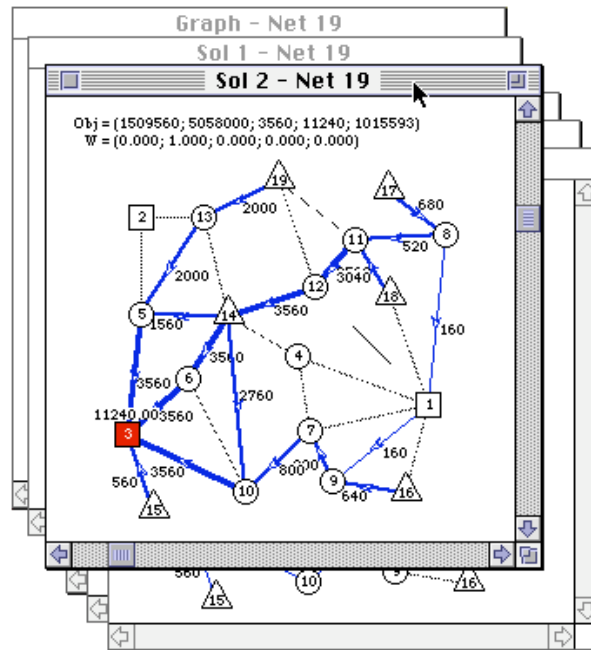


4.5 Exemplo

As janelas vão ficando parcialmente sobrepostas como se representa na figura 24, podendo posteriormente fazer-se qualquer uma delas activa com um clic sobre ela (figura 25).

Figura 25

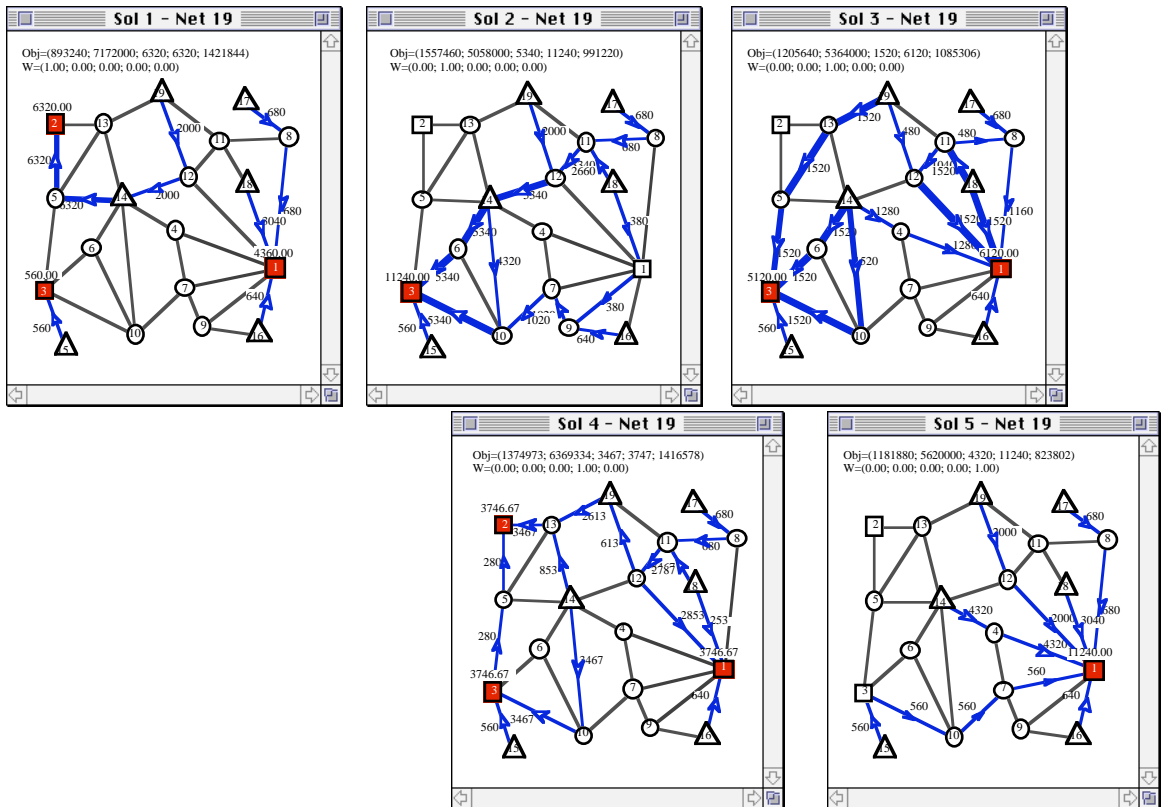
Activando a janela da solução 2 com o rato



As janelas podem também ser deslocadas no ecrã ou redimensionadas usando o rato.

Figura 26

As janelas com as cinco soluções iniciais, todas visíveis



O modelo matemático necessário para o cálculo de cada solução é gerado sem a intervenção do utilizador. Uma amostra desse modelo, para o cálculo da primeira solução, é apresentada a seguir.

- 72.000 X1_1_4 - 72.000 X1_4_1 - 65.000 X2_1_7 - 65.000 X2_7_1 - 78.000 X3_1_8 - 78.000 X3_8_1 - 27.000 X4_1_9 - 27.000 X4_9_1 - 94.000 X5_1_12 - 94.000 X5_12_1 - 30.000 X6_1_16 - 30.000 X6_16_1 - 87.000 X7_1_18 - 87.000 X7_18_1 - 48.000 X8_2_5 - 48.000 X8_5_2 - 90.000 X9_2_13 - 90.000 X9_13_2 - 78.000 X10_3_5 - 78.000 X10_5_3 - 34.000 X11_3_6 - 34.000 X11_6_3 - 60.000 X12_3_10 - 60.000 X12_10_3 - 81.000 X13_3_15 - 81.000 X13_15_3 - 72.000 X14_4_7 - 72.000 X14_7_4 - 10.000 X15_4_14 - 10.000 X15_14_4 - 45.000 X16_5_13 - 45.000 X16_13_5 - 1.000 X17_5_14 - 1.000 X17_14_5 - 21.000 X18_6_10 - 21.000 X18_10_6 - 68.000 X19_6_14 - 68.000 X19_14_6 - 8.000 X20_7_9 - 8.000 X20_9_7 - 68.000 X21_7_10 - 68.000 X21_10_7 - 15.000 X22_8_11 - 15.000 X22_11_8 - 61.000 X23_8_17 - 61.000 X23_17_8 - 56.000 X24_9_16 - 56.000 X24_16_9 - 31.000 X25_10_14 - 31.000 X25_14_10 - 3.000 X26_11_12 - 3.000 X26_12_11 - 18.000 X27_11_18 - 18.000 X27_18_11 - 59.000 X28_11_19 - 59.000 X28_19_11 - 26.000 X29_12_14 - 26.000 X29_14_12 - 54.000 X30_12_19 - 54.000 X30_19_12 - 77.000 X31_13_14 - 77.000 X31_14_13 - 56.000 X32_13_19 - 56.000 X32_19_13 - 0.000000050000 X1_4_1 + 0.000000050000 X1_1_4 - 0.000000050000 X2_7_1 + 0.000000050000 X2_1_7 - 0.000000050000 X3_8_1 + 0.000000050000 X3_1_8 - 0.000000050000 X4_9_1 + 0.000000050000 X4_1_9 - 0.000000050000 X5_12_1 + 0.000000050000 X5_1_12 - 0.000000050000 X6_16_1 + 0.000000050000 X6_1_16 - 0.000000050000 X7_18_1 + 0.000000050000 X7_1_18 - 0.000000075000 X8_5_2 + 0.000000075000 X8_2_5 - 0.000000075000 X9_13_2 + 0.000000075000 X9_2_13 - 0.000000045000 X10_5_3 + 0.000000045000 X10_3_5 - 0.000000045000 X11_6_3 + 0.000000045000 X11_3_6 - 0.000000045000 X12_10_3 + 0.000000045000 X12_3_10 - 0.000000045000 X13_15_3 + 0.000000045000 X13_3_15 - 0.000000100000 M - 0.000000100000 P - 0.00000001612 X1_1_4 - 0.00000001612 X1_4_1 - 0.00000001456 X2_1_7 - 0.00000001456 X2_7_1 - 0.00000004205 X3_1_8 - 0.00000004205 X3_8_1 - 0.00000000949 X4_1_9 - 0.00000000949 X4_9_1 - 0.00000002283 X5_1_12 - 0.00000002283 X5_12_1 - 0.00000001513 X6_1_16 - 0.00000001513 X6_16_1 - 0.00000001910 X7_1_18 - 0.00000001910 X7_18_1 - 0.00000001700 X8_2_5 - 0.00000001700 X8_5_2 - 0.00000001100 X9_2_13 - 0.00000001100 X9_13_2 - 0.00000002702 X10_3_5 - 0.00000002702 X10_5_3 - 0.00000001500 X11_3_6 - 0.00000001500 X11_6_3 -

4.5 Exemplo

```
0.000000002332 X12_3_10 - 0.000000002332 X12_10_3 - 0.000000000781 X13_3_15 - 0.000000000781 X13_15_3 - 0.000000001200 X14_4_7 -
0.000000001200 X14_7_4 - 0.000000000906 X15_4_14 - 0.000000000906 X15_14_4 - 0.000000002025 X16_5_13 - 0.000000002025 X16_13_5 -
0.000000001897 X17_5_14 - 0.000000001897 X17_14_5 - 0.000000001100 X18_6_10 - 0.000000001100 X18_10_6 - 0.000000001204 X19_6_14 -
0.000000001204 X19_14_6 - 0.000000001208 X20_7_9 - 0.000000001208 X20_9_7 - 0.000000000721 X21_7_10 - 0.000000000721 X21_10_7 -
0.000000001523 X22_8_11 - 0.000000001523 X22_11_8 - 0.000000000894 X23_8_17 - 0.000000000894 X23_17_8 - 0.000000000608 X24_9_16 -
0.000000000608 X24_16_9 - 0.000000000949 X25_10_14 - 0.000000000949 X25_14_10 - 0.000000001063 X26_11_12 - 0.000000001063 X26_12_11 -
0.000000001082 X27_11_18 - 0.000000001082 X27_18_11 - 0.000000001879 X28_11_19 - 0.000000001879 X28_19_11 - 0.000000001628 X29_12_14 -
0.000000001628 X29_14_12 - 0.000000002502 X30_12_19 - 0.000000002502 X30_19_12 - 0.000000002404 X31_13_14 - 0.000000002404 X31_14_13 -
0.000000002220 X32_13_19 - 0.000000002220 X32_19_13 - 0.000024000000 Y1 - 0.000030000000 Y2 - 0.000020000000 Y3 - 0.000000002200 X1_4_1
+ 0.000000002200 X1_1_4 - 0.000000002200 X2_7_1 + 0.000000002200 X2_1_7 - 0.000000002200 X3_8_1 + 0.000000002200 X3_1_8 -
0.000000002200 X4_9_1 + 0.000000002200 X4_1_9 - 0.000000002200 X5_12_1 + 0.000000002200 X5_1_12 - 0.000000002200 X6_16_1 +
0.000000002200 X6_1_16 - 0.000000002200 X7_18_1 + 0.000000002200 X7_1_18 - 0.000000002500 X8_5_2 + 0.000000002500 X8_2_5 -
0.000000002500 X9_13_2 + 0.000000002500 X9_2_13 - 0.000000002000 X10_5_3 + 0.000000002000 X10_3_5 - 0.000000002000 X11_6_3 +
0.000000002000 X11_3_6 - 0.000000002000 X12_10_3 + 0.000000002000 X12_3_10 - 0.000000002000 X13_15_3 + 0.000000002000 X13_3_15;
X15_14_4 - X15_4_14 + X17_14_5 - X17_5_14 + X19_14_6 - X19_6_14 + X25_14_10 - X25_10_14 + X29_14_12 - X29_12_14 + X31_14_13 -
X31_13_14 = 4320.000;
X13_15_3 - X13_3_15 = 560.000;
X6_16_1 - X6_1_16 + X24_16_9 - X24_9_16 = 640.000;
X23_17_8 - X23_8_17 = 680.000;
X7_18_1 - X7_1_18 + X27_18_11 - X27_11_18 = 3040.000;
X28_19_11 - X28_11_19 + X30_19_12 - X30_12_19 + X32_19_13 - X32_13_19 = 2000.000;
X1_4_1 - X1_1_4 + X2_7_1 - X2_1_7 + X3_8_1 - X3_1_8 + X4_9_1 - X4_1_9 + X5_12_1 - X5_1_12 + X6_16_1 - X6_1_16 + X7_18_1 - X7_1_18 -
34650.000 Y1 <= 0;
X8_5_2 - X8_2_5 + X9_13_2 - X9_2_13 - 34650.000 Y2 <= 0;
X10_5_3 - X10_3_5 + X11_6_3 - X11_3_6 + X12_10_3 - X12_3_10 + X13_15_3 - X13_3_15 - 34650.000 Y3 <= 0;
X1_4_1 - X1_1_4 + X2_7_1 - X2_1_7 + X3_8_1 - X3_1_8 + X4_9_1 - X4_1_9 + X5_12_1 - X5_1_12 + X6_16_1 - X6_1_16 + X7_18_1 - X7_1_18 >= 0;
X8_5_2 - X8_2_5 + X9_13_2 - X9_2_13 >= 0;
X10_5_3 - X10_3_5 + X11_6_3 - X11_3_6 + X12_10_3 - X12_3_10 + X13_15_3 - X13_3_15 >= 0;
X1_1_4 - X1_4_1 + X14_7_4 - X14_4_7 + X15_14_4 - X15_4_14 = 0;
X8_2_5 - X8_5_2 + X10_3_5 - X10_5_3 + X16_13_5 - X16_5_13 + X17_14_5 - X17_5_14 = 0;
X11_3_6 - X11_6_3 + X18_10_6 - X18_6_10 + X19_14_6 - X19_6_14 = 0;
X2_1_7 - X2_7_1 + X14_4_7 - X14_7_4 + X20_9_7 - X20_7_9 + X21_10_7 - X21_7_10 = 0;
X3_1_8 - X3_8_1 + X22_11_8 - X22_8_11 + X23_17_8 - X23_8_17 = 0;
X4_1_9 - X4_9_1 + X20_7_9 - X20_9_7 + X24_16_9 - X24_9_16 = 0;
X12_3_10 - X12_10_3 + X18_6_10 - X18_10_6 + X21_7_10 - X21_10_7 + X25_14_10 - X25_10_14 = 0;
X22_8_11 - X22_11_8 + X26_12_11 - X26_11_12 + X27_18_11 - X27_11_18 + X28_19_11 - X28_11_19 = 0;
X5_1_12 - X5_12_1 + X26_11_12 - X26_12_11 + X29_14_12 - X29_12_14 + X30_19_12 - X30_12_19 = 0;
X9_2_13 - X9_13_2 + X16_5_13 - X16_13_5 + X31_14_13 - X31_13_14 + X32_19_13 - X32_13_19 = 0;
X1_4_1 + X14_4_7 + X15_4_14 <= M;
X8_5_2 + X10_5_3 + X16_5_13 + X17_5_14 <= M;
X11_6_3 + X18_6_10 + X19_6_14 <= M;
X2_7_1 + X14_7_4 + X20_7_9 + X21_7_10 <= M;
X3_8_1 + X22_8_11 + X23_8_17 <= M;
X4_9_1 + X20_9_7 + X24_9_16 <= M;
X12_10_3 + X18_10_6 + X21_10_7 + X25_10_14 <= M;
X22_11_8 + X26_11_12 + X27_11_18 + X28_11_19 <= M;
X5_12_1 + X26_12_11 + X29_12_14 + X30_12_19 <= M;
X9_13_2 + X16_13_5 + X31_13_14 + X32_13_19 <= M;
X6_1_16 <= M;
X6_16_1 <= M;
X7_1_18 <= M;
X7_18_1 <= M;
X13_3_15 <= M;
X13_15_3 <= M;
X1_4_1 - X1_1_4 + X2_7_1 - X2_1_7 + X3_8_1 - X3_1_8 + X4_9_1 - X4_1_9 + X5_12_1 - X5_1_12 + X6_16_1 - X6_1_16 + X7_18_1 - X7_1_18 <= P;
X8_5_2 - X8_2_5 + X9_13_2 - X9_2_13 <= P;
X10_5_3 - X10_3_5 + X11_6_3 - X11_3_6 + X12_10_3 - X12_3_10 + X13_15_3 - X13_3_15 <= P;
int Y1 Y2 Y3;
```

4.5.3 Comparar as Primeiras Soluções

Em qualquer altura podem as soluções já calculadas ser comparadas através de representações gráficas numa janela:

- i) Escolher o comando *Solution Basket...* no menu *Solutions*.

Figura 27

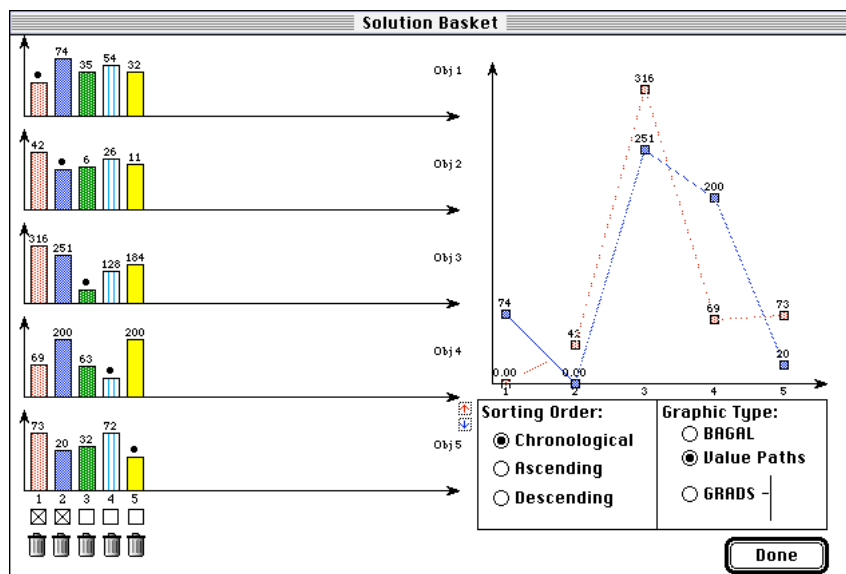
Comando para visualizar Solution Basket



- ii) Na janela apresentada são representadas as soluções através de gráficos de colunas (um conjunto para cada objectivo). As colunas podem ser ordenadas de forma crescente ou decrescente em relação aos valores de qualquer objectivo.
- iii) Marcar as caixas correspondentes a soluções particulares que se queiram comparar entre si (na figura, soluções 1 e 2).
- iv) Escolher o tipo de representação gráfica adicional para comparar as soluções seleccionadas pressionando o botão respectivo: BAGAL, “Value Paths” ou GRADS.

Figura 28

Soluções representadas em gráficos de colunas e “Value Paths”



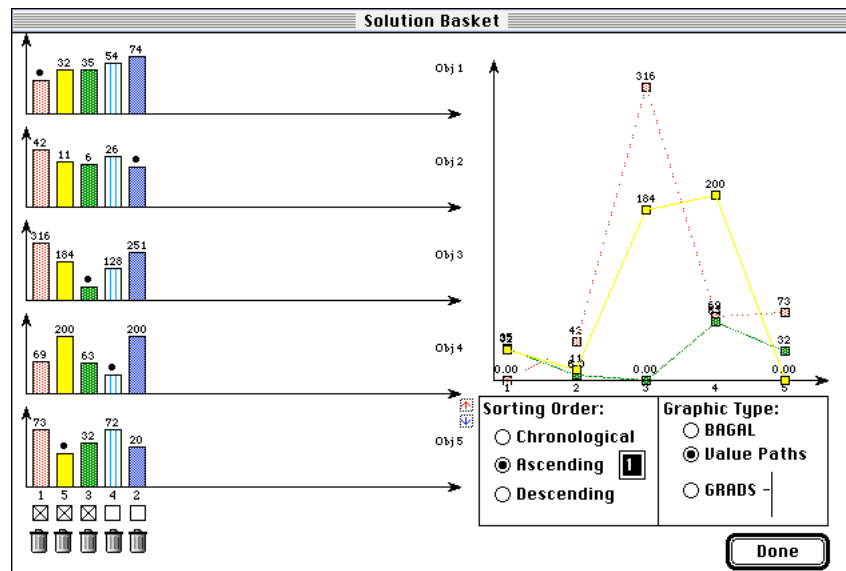
4.5 Exemplo

v) Premindo o botão “Done” fecha-se a janela.

As colunas podem aparecer representando as soluções pela respectiva ordem cronológica ou ordenadas por ordem crescente ou decrescente dos valores de qualquer um dos objectivos. Por exemplo, na figura 29 as colunas aparecem ordenadas pela ordem crescente dos valores obtidos para o objectivo 1 nas cinco soluções representadas.

Figura 29

Visualização de gráficos com soluções ordenadas



Para, na parte direita da janela, aparecerem as duas seleccionadas representadas com BAGAL ou com GRADS, bastaria o utilizador pressionar o botão correspondente.

4.5.4 Calcular Soluções Adicionais

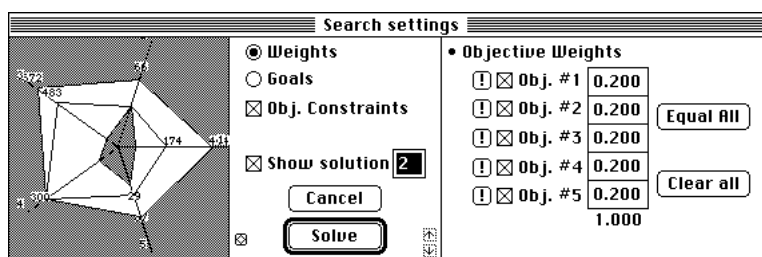
4.5.4.1 Cálculo com Soma Pesada de Objectivos

i) Escolher o comando *Continue Search...* no menu *Solutions*.

- ii) Introduzir, no diálogo apresentado, os valores dos pesos para os objectivos a usar no cálculo.

Figura 30

Diálogo para introdução de parâmetros de cálculo (5 pesos iguais)

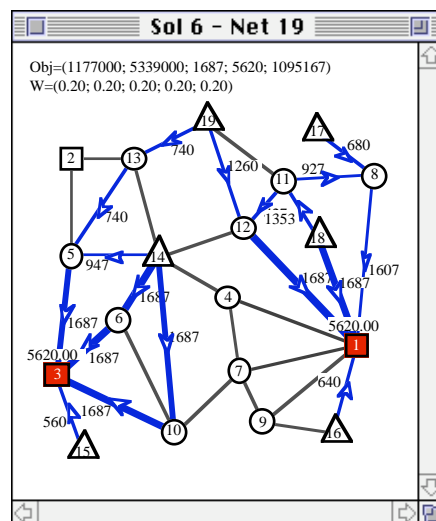


- iii) Premir o botão “Solve”.

É então gerado o modelo matemático e determinada a solução do problema, que é apresentada numa nova janela.

Figura 31

Solução 6, obtida com cinco pesos iguais



4.5.4.2 Cálculo com Soma Pesada de Objectivos e Restrições Adicionais

Suponhamos que, depois de observados os valores atingidos para os cinco critérios na última solução e, em particular os valores para o primeiro e último deles ($Z_1=1\ 177\ 000$) ($Z_5=1\ 095\ 167$), o agente de decisão pretende, usando ainda um conjunto de cinco pesos iguais, pesquisar a

4.5 Exemplo

eventual existência de alguma solução em que os valores para aqueles dois objectivos não ultrapassassem os seguintes limites:

$$Z_1 \leq 1\,110\,000 \text{ (número de pessoas em risco provocado pelo transporte)}$$

$$Z_5 \leq 1\,090\,000 \text{ (custo total da solução).}$$

Para tal deverá:

- i) Escolher o comando *Continue Search...* no menu **Solutions**.
- ii) Introduzir, no diálogo apresentado, os valores dos pesos, e
- iii) Introduzir os valores das restrições adicionais para os objectivos a usar no cálculo, depois de as activar.

Figura 32

Diálogo para introdução de parâmetros de cálculo (pesos e restrições adicionais)

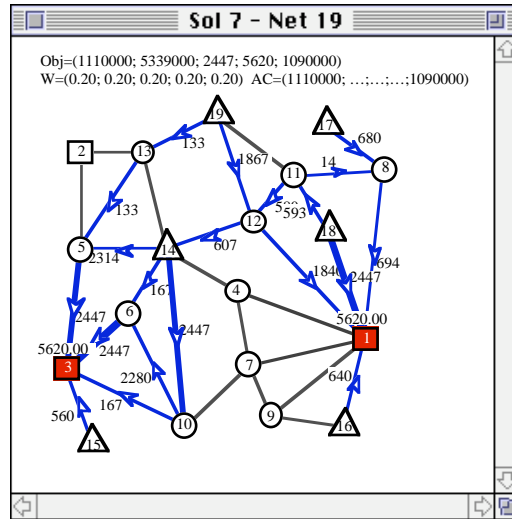
Object.	Lower B.	Imposed v.	Upper B.	%
<input checked="" type="checkbox"/> 1	893240.0	1110000.0	2163460.0	24.3
<input type="checkbox"/> 2				
<input type="checkbox"/> 3				
<input type="checkbox"/> 4				
<input checked="" type="checkbox"/> 5	823802.0	1090000.0	1421844.4	32.3

- iv) Premir o botão “Solve”.

É então gerado o modelo matemático e determinada a solução do problema, que é apresentada numa nova janela.

Figura 33

Solução 7, obtida com cinco pesos iguais e 2 restrições adicionais



4.5.4.3 Cálculo com Programação por Metas

O sistema permite ainda que o agente de decisão possa efectuar pesquisas através da imposição de metas a atingir para um ou mais objectivos e de prioridades para essas metas. Para tal deverá:

- i) Escolher o comando *Continue Search...* no menu **Solutions**.
- ii) Pressionar, no diálogo apresentado, o botão “Goals”.
- iii) Introduzir, no diálogo, os valores das metas a atingir para cada objectivo (opcionalmente, poderão ser também introduzidas restrições adicionais para os objectivos).
- iv) Introduzir os valores das restrições adicionais para os objectivos a usar no cálculo.
- v) Premir o botão “Solve”.

Na figura 34 é apresentado um diálogo para especificação dos parâmetros de pesquisa em que esta será efectuada de modo a obter uma solução que:

4.5 Exemplo

- i) como primeira prioridade, tenha um valor para o objectivo 1 não superior a 123% do valor do respectivo limite inferior e,
- ii) como segunda prioridade, tenha um valor para o objectivo 3 não superior a 110% do valor do respectivo limite inferior e
- iii) como terceira prioridade, tenha um valor para o objectivo 2 não superior a 110% do valor do respectivo limite inferior.

Figura 34

Diálogo para nova pesquisa com metas impostas para 3 objectivos

Search settings

Weights
 Goals
 Obj. Constraints
 Show solution

Cancel Solve

Objective Constraints

Obj.	Lower B.	Imposed v.	Upper B.	-	+	%
<input type="checkbox"/> 1						
<input type="checkbox"/> 2						
<input type="checkbox"/> 3						
<input type="checkbox"/> 4						
<input type="checkbox"/> 5						

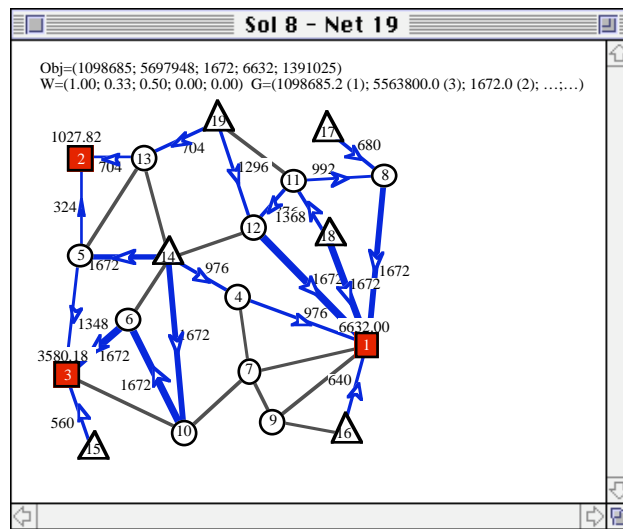
Goals Definition

Priority	Obj.	Lower B.	Goals	Upper B.	-	+	Weighting factor:	%
<input checked="" type="checkbox"/> 1st	1	893240	1098685	1557460			23.0	
<input checked="" type="checkbox"/> 2nd	3	1520	1672	6320			10.0	
<input checked="" type="checkbox"/> 3rd	2	5058000	5563800	7172000			10.0	
<input type="checkbox"/> 4th								
<input type="checkbox"/> 5th								

Tal como nos casos anteriores, é gerado o modelo matemático e determinada a solução do problema, que é apresentada numa nova janela (figura 35).

Figura 35

Solução na rede, obtida com pesquisa através de programação por metas



Nesta janela podem observar-se, como habitualmente, os sítios escolhidos para abrir centrais, o nível de serviço atribuído a cada uma e os fluxos de materiais a serem transportados através de cada ligação da rede, de modo a encaminhar a totalidade dos resíduos transportados desde as diversas fontes até às centrais abertas. Os valores atingidos para cada um dos cinco objectivos também aparecem na janela, bem como os valores das metas impostas no cálculo.

4.5.5 Comparar Soluções

Em qualquer altura podem as soluções já calculadas ser comparadas através de representações gráficas numa janela:

- i) Escolher o comando *Solution Basket...* no menu *Solutions*.
- ii) Na janela apresentada são representadas as soluções através de gráficos de colunas (um conjunto para cada objectivo). As colunas podem

4.5 Exemplo

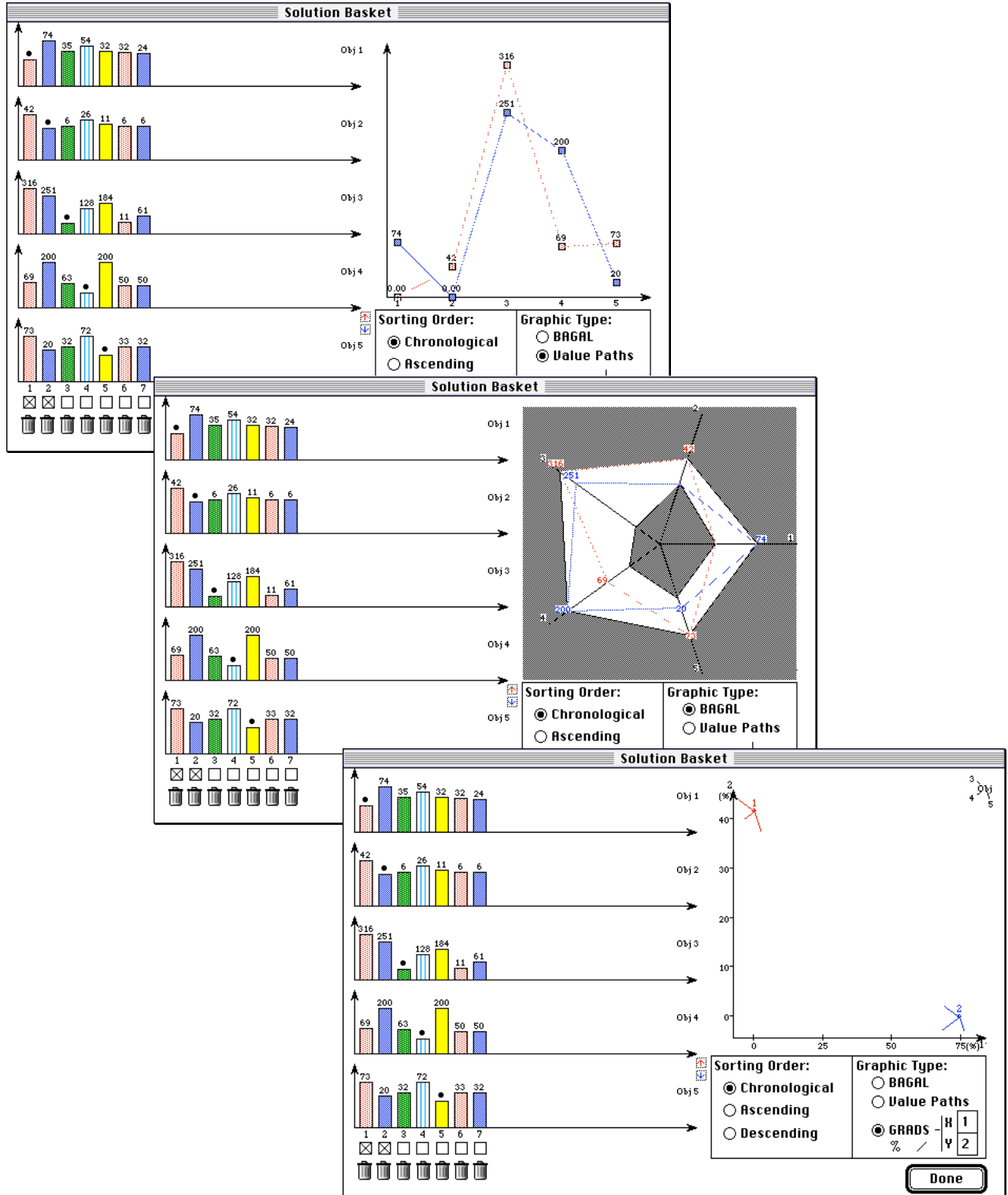
ser ordenadas de forma crescente ou decrescente em relação aos valores de qualquer objectivo.

- iii) Marcar as caixas correspondentes a soluções particulares que se queiram comparar entre si (na figura, soluções 5 e 7).
- iv) Escolher o tipo de representação gráfica adicional para comparar as soluções seleccionadas pressionando o botão respectivo: BAGAL, “Value Paths” ou GRADS.
- v) Premindo o botão “Done” fecha-se a janela.

Assim, supondo que após o cálculo da solução 7 se pretendia comparar soluções, com este procedimento poderiam ser visualizados resultados como os que se apresentam na figura 36.

Figura 36

Comparação de soluções: colunas e “Value Paths” ou teia ou GRADS



4.5 Exemplo

4.5.6 Editar a Rede

A rede pode ser alterada na janela que contém o grafo representativo do problema (figura 23). Para editar os parâmetros relacionados com qualquer nó ou arco, basta fazer dois *clicks* sobre o nó ou arco pretendido. É visualizado um diálogo contendo os respectivos parâmetros, onde os mesmos podem ser alterados.

Na figura 37 é apresentado o diálogo com os parâmetros de um arco. A designação, os nós extremos, o comprimento e a população podem aí ser alterados.

Figura 37

Diálogo para edição de parâmetros de um arco

Arc 31.			
• Nodes		Name TN 30-WASTE 2	
head	13		
tail	14		
• Parameters:			
1- Length	24.04	17.68	=Eucl. dist.
2- Population	77.00		1.35973

Também podem ser editados os dados de vários arcos em simultâneo desde que eles estejam seleccionados e se façam dois *clicks* sobre um deles.

Na figura 38 é apresentado o diálogo com os parâmetros de um nó.

No caso de este corresponder a um local candidato à localização de uma central, ficam activos os campos que permitem introduzir os dados relativos a custos e capacidade.

Figura 38

Diálogo para edição de parâmetros de uma nó

The image shows a dialog box titled "Node" with a subtitle "Node -> 2". It contains several input fields and buttons. The "Name" field is set to "FAC 2". The "H=" field is 50.00 and the "Y=" field is 52.00. The "Waste" field is 0.0 and the "Population" field is 750.0. There is a checked checkbox for "Facility site". Under "Facility site", there are three fields: "Max capacity" (34650.0), "Fixed Cost" (300000.), and "Var. Cost" (25.0). There is a "+..." button next to the "Var. Cost" field. On the right side, there are "Cancel" and "OK" buttons.

Name	FAC 2
H=	50.00
Y=	52.00
Waste	0.0
Population	750.0
<input checked="" type="checkbox"/> Facility site	
Max capacity	34650.0
Fixed Cost	300000.
Var. Cost	25.0

Para eliminar um arco ou um nó, basta marcá-lo fazendo sobre ele um *clik* com o rato e, a seguir, premir a tecla *Delete*. Esta operação só é concluída depois de o utilizador a confirmar num diálogo que é apresentado.