

Teresa Cristina Melo Fragoso

ANÁLISE ESTRATÉGICA DA EXPANSÃO DE INFRAESTRUTURAS URBANÍSTICAS

Tese de doutoramento em Engenharia Civil, ramo de Urbanismo, Transportes e Vias da Comunicação, orientada pelo Professor Doutor António José Pais Antunes e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Setembro 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Teresa Cristina Melo Fragoso

Análise Estratégica da Expansão de Infraestruturas Urbanísticas

Tese de doutoramento em Engenharia Civil, ramo de Urbanismo, Transportes e Vias da Comunicação,
orientada pelo Professor Doutor António José Pais Antunes e apresentada ao Departamento de
Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

setembro, 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

A ti, a quem dei a mão para nunca mais largar.

À Madalena, de gargalhada farta. A música da minha vida.

Ao Salvador, o meu coração de ouro.

À Teresinha, para quem sou a mais linda. A coisa mais
querida.

Ao Joaquim, que diz não querer crescer para que a mãe lhe
chame para sempre o seu fofinho. Que bela desculpa para
não comer a sopa!

E eu, que cinco boas desculpas tenho para ser feliz!

O presente trabalho foi financiado pela Bolsa de Doutoramento da Fundação para a Ciência e Tecnologia, referência SFRH/BD/37627/2007 com duração de 17 meses.

E pela Bolsa de Doutoramento da mesma fundação ao abrigo do programa PROTEC, referência SFRH/PROTEC/49802/2009, com duração de 24 meses.



Agradecimentos

Agradeço a todos que, de uma forma ou de outra, tornaram possível a realização do presente trabalho, pelo afeto, pelo apoio, pelas chamadas de atenção, pelas palavras de incentivo quando tantas vezes pensei não ser capaz.

Em especial ao Professor Doutor António José Pais Antunes, responsável pela orientação, agradeço o exemplo no rigor e na determinação. Agradeço ainda a sua disponibilidade e o apoio, sem os quais não teria sido possível realizar o trabalho.

À minha família, agradeço a presença sempre constante nos momentos mais críticos, permitindo assim, da minha parte, uma maior disponibilidade para a elaboração do trabalho.

RESUMO

Quando uma cidade já não consegue conter o crescimento populacional no espaço que ocupa torna-se necessário prever novas áreas de expansão. Para que a escolha destas áreas seja feita de forma a ter em conta os requisitos indispensáveis para se obterem os melhores traçados das respetivas infraestruturas urbanísticas em termos físicos e económicos constrói-se um modelo de apoio à decisão. Este modelo contempla de forma integrada os dados necessários àqueles mesmos traçados, deixando como variáveis as novas áreas de expansão. As infraestruturas em análise no presente trabalho são a rede de abastecimento de água, a rede de drenagem de águas residuais e a rede de transportes.

O problema traduzido por aquele modelo de apoio à decisão é multiobjetivo, complexo e de grandes dimensões. Para a sua resolução é necessário recorrer a um método heurístico.

No presente trabalho o método utilizado é o Recozimento Simulado articulado, pela existência de objetivos múltiplos, com um método de aproximação da Fronteira de Pareto.

Analisar a dinâmica do problema compreendendo as soluções provenientes da sua resolução, é o grande desafio desta tese no sentido de permitir a produção de informação que dê a possibilidade aos responsáveis pelas tomadas de decisão de realizarem ações mais fundamentadas e ponderadas no planeamento e dimensionamento setorial de cada infraestrutura. Desta forma, a escolha das áreas mais favoráveis para a expansão da cidade não tem em conta apenas as características físicas do terreno, mas também o comportamento integrado, ainda que por vezes conflituoso, das três infraestruturas em análise.

ABSTRACT

New areas of expansion are needed when cities can no longer sustain the increase in population within their territory. For the appropriate choice of the newly occupied areas, a decision support model is built in order to optimize layouts and costs for the urban infrastructures. The model must contain all data needed for the infrastructure layout design, considering the new areas to be occupied as variables.

In this work, urban infrastructures of water supply, drainage and transportation systems are simultaneously taken in account.

Due to its multi-objective properties, size and complexity, a heuristic method is chosen to solve the problem described. Simulated Annealing has been used in order to tackle this multi-objective problem.

The main goal of the thesis is therefore the development of tools allowing decision makers to make better informed decisions on urban planning choices, taking not only into account the physical land-use suitability criteria, but also, in an integrated way, the behavior or the main infrastructures.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABELAS.....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 A PROBLEMÁTICA DA EXPANSÃO DE INFRAESTRUTURAS URBANÍSTICAS 12	
3 METODOLOGIA DE ANÁLISE DA EXPANSÃO DE INFRAESTRUTURAS URBANÍSTICAS	21
4 MODELO DE APOIO À DECISÃO PARA EXPANSÃO DE INFRAESTRUTURAS URBANÍSTICAS	27
4.1 Introdução	27
4.2 Construção do Modelo Matemático	29
4.2.1 Função Objetivo	30
4.2.2 Restrições.....	34
5 MÉTODO DE RESOLUÇÃO DO MODELO DE APOIO À DECISÃO	37
5.1 Introdução	37
5.2 O Método do Recozimento Simulado para um Problema com um Objetivo	42
5.2.1 Origem do Método.....	42
5.2.2 Algoritmo do Recozimento Simulado	49
5.2.3 Convergência e Tempo de Resolução	51
5.3 Algoritmo do Recozimento Simulado para um Problema Multiobjetivo.....	57
6 APLICAÇÃO DO MODELO DE APOIO À DECISÃO.....	67
6.1 Introdução.....	67
6.2 Caracterização da Cidade Hipotética.....	69
6.3 Implementação do Algoritmo do Recozimento Simulado	94
6.3.1 Escolha da Solução Inicial e Geração das Soluções Candidatas	94
6.3.2 Processo de Arrefecimento	97
6.3.3 Calibração do Algoritmo	102
6.3.4 Robustez do Algoritmo.....	110
6.3.5 Esforço Computacional	125

6.4	Análise de Resultados.....	138
7	CONCLUSÃO.....	168
7.1	Sumário.....	168
7.2	Desenvolvimentos Futuros	172
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	176
	ANEXO A	184
	ANEXO B	215
	ANEXO C	217
	ANEXO D	234
	ANEXO E.....	243
	ANEXO F.....	251

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Metodologia de análise.	22
Figura 4.1 – Grafo representativo da cidade, com pormenor de um nó representativo de um centróide enquanto bairro ou conjunto de bairros.	30
Figura 5.1 – Representação de uma estratégia descendente (adaptado de Reeves (1993)).	43
Figura 5.2 - Algoritmo do Recozimento Simulado para um problema com um objetivo.	50
Figura 5.3 - Interpretação geométrica do Método da Soma Ponderada (exemplo de minimização de uma função com dois objetivos).	61
Figura 5.4 - Método de aproximação da Fronteira de Pareto – conceito de Dominância (exemplo de minimização de uma função com dois objetivos).	63
Figura 5.5 - Algoritmo do Recozimento Simulado para um problema com objetivos múltiplos.	64
Figura 6.1 - Representação da área da cidade existente com os centróides e respetivas áreas de influência.	70
Figura 6.2 - Exemplo da topografia para a área de estudo.	70
Figura 6.3 - Distribuição da população pelos centróides residenciais e centrais.	72
Figura 6.4 - Representação da cidade existente e respetivo domínio de expansão.	74
Figura 6.5 - Exemplo de geração de um mapa relativo ao índice indicador da permeabilidade do terreno, a partir da divisão da área em estudo em 12 subáreas ((a) duas dimensões, (b) três dimensões).	76
Figura 6.6 - Adequabilidade da exposição solar para edificação.	77
Figura 6.7 - Exemplo de um mapa de classificação da exposição solar para a área em estudo ((a) duas dimensões, (b) três dimensões).	78
Figura 6.8 - Exemplo de um mapa de classificação de declives para a área em estudo ((a) duas dimensões, (b) três dimensões).	80
Figura 6.9 - Mapa representativo do Índice de Aptidão para a área em estudo.	81

Figura 6.10 - Traçado da rede de transportes para a cidade existente.	84
Figura 6.11 - Método Iterativo para atribuição de tráfego à rede de transportes.	86
Figura 6.12 - Traçado da rede de drenagem para a cidade existente.	88
Figura 6.13 - Traçado da rede de abastecimento para a cidade existente.	91
Figura 6.14 - Processo de Arrefecimento (adaptado de Johnson <i>et al.</i> (1989)).	101
Figura 6.15 - Resultados das cem execuções do algoritmo relativos às quatro combinações de pesos ((a) combinação de pesos 1, (b) combinação de pesos 2, (c) combinação de pesos 3, (d) combinação de pesos 4).	105
Figura 6.16 – Mapa representativo do Índice de Aptidão de acordo com a Tabela 6.2 (cidade existente e domínio de expansão).	112
Figura 6.17- Topografia (cidade existente e domínio de expansão).	113
Figura 6.18 – Inclinação do terreno (cidade existente e domínio de expansão).	113
Figura 6.19 – Indicador da permeabilidade (cidade existente e domínio de expansão).	113
Figura 6.20 – Indicador da exposição solar (cidade existente e domínio de expansão).	114
Figura 6.21 – Traçado da rede de transportes (cidade existente).	114
Figura 6.22 – Traçado da rede de drenagem de águas residuais (cidade existente).	115
Figura 6.23 – Traçado da rede de abastecimento de água (cidade existente).	116
Figura 6.24 – Resultados das execuções do algoritmo para verificação da robustez do algoritmo – traçados da rede de transportes.	117
Figura 6.25 – Resultados das execuções do algoritmo para verificação da robustez do algoritmo- traçados da rede de drenagem de águas residuais.	118
Figura 6.26 – Resultados das execuções do algoritmo para verificação da robustez do algoritmo - traçados da rede de abastecimento de água.	119
Figura 6.27 – Traçado da rede de transportes para a solução de custo mínimo das dez execuções.	122
Figura 6.28 – Traçado da rede de drenagem para a solução de custo mínimo das dez execuções.	123

Figura 6.29 – Traçado da rede de abastecimento para a solução de custo mínimo das dez execuções.....	124
Figura 6.30 – Cenário 1, solução de custo mínimo - redes de transportes, de drenagem de águas residuais e abastecimento de água.....	126
Figura 6.31 – Cenário 2, solução de custo mínimo - redes de transportes, de drenagem de águas residuais e abastecimento de água.....	127
Figura 6.32 – Cenário 3, solução de custo mínimo - redes de transportes, de drenagem de águas residuais e abastecimento de água.....	128
Figura 6.33 – Cenário 4, solução de custo mínimo - redes de transportes, de drenagem de águas residuais e abastecimento de água.....	129
Figura 6.34 – Cenário 5, solução de custo mínimo - redes de transportes, de drenagem de águas residuais e abastecimento de água.....	130
Figura 6.35 – Cenário 6, solução de custo mínimo - redes de transportes, de drenagem de águas residuais e abastecimento de água.....	131
Figura 6.36 – Cenário 7, solução de custo mínimo - redes de transportes, de drenagem de águas residuais e abastecimento de água.....	132
Figura 6.37 – Cenário 8, solução de custo mínimo - redes de transportes, de drenagem de águas residuais e abastecimento de água.....	133
Figura 6.38 - Análise da variação do número e localização das áreas de expansão com o crescimento populacional sofrido pela cidade (20%, 30%, 45%).	140
Figura 6.39 - Caracterização da solução de custo mínimo, para um crescimento populacional de 30 % e considerando duas densidades na expansão – rede de transportes.	142
Figura 6.40 - Caracterização da solução de custo mínimo, para um crescimento populacional de 30 % e considerando duas densidades na expansão – rede de abastecimento.....	143
Figura 6.41 - Caracterização da solução de custo mínimo, para um crescimento populacional de 30 % e considerando duas densidades na expansão – rede de drenagem.	144
Figura 6.42 - Combinação 1: pesos iguais para todos os componentes da função objetivo...	147
Figura 6.43 - Combinação 2: peso superior para o componente relativo à rede de transportes.	148

Figura 6.44 - Combinação 3: peso superior para o componente relativo à rede de abastecimento de água.....	150
Figura 6.45 - Combinação 4: peso superior para o componente relativo à rede de drenagem.	151
Figura 6.46 - Combinação 1: pesos iguais para todos os componentes da função objetivo...	155
Figura 6.47 - Combinação 2: peso superior para o componente relativo à rede de transportes.	156
Figura 6.48- Combinação 3: peso superior para o componente relativo à rede de abastecimento.	157
Figura 6.49 – Combinação 4: peso superior para o componente relativo à rede de drenagem.	158
Figura 6.50 – Combinação 1: pesos iguais para todos os componentes da função objetivo..	162
Figura 6.51 – Combinação 2: peso superior para o componente relativo à rede de transportes.	163
Figura 6.52 – Combinação 3: peso superior para o componente relativo à rede de abastecimento.	164
Figura 6.53 – Combinação 4: peso superior para o componente relativo à rede de drenagem.	165

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5.1 – Analogia entre o Problema de Termodinâmica e o Problema de Otimização	49
Tabela 6.1 – Adequabilidade de declives para edificação.....	79
Tabela 6.2 – Índice de Aptidão indicador da adequabilidade do terreno à construção.	81
Tabela 6.3 – Combinações de pesos.....	102
Tabela 6.4 – Resultados das vinte e cinco melhores execuções do algoritmo em relação ao valor da função objetivo para a combinação de pesos 1.	106
Tabela 6.5 – Resultados das vinte e cinco melhores execuções do algoritmo em relação ao valor da função objetivo para a combinação de pesos 2.	107
Tabela 6.6 – Resultados das vinte e cinco melhores execuções do algoritmo em relação ao valor da função objetivo para a combinação de pesos 3.	108
Tabela 6.7 – Resultados das vinte e cinco melhores execuções do algoritmo em relação ao valor da função objetivo para a combinação de pesos 4.	109
Tabela 6.8 – Cenário para avaliação da robustez do algoritmo.....	111
Tabela 6.9 – Desvios dos valores da função objetivo relativos às dez execuções para verificação da robustez do algoritmo.	120
Tabela 6.10 – Caracterização dos centróides novos na solução de custo mínimo das dez execuções.....	124
Tabela 6.11 – Cenários para avaliação do esforço computacional.....	125
Tabela 6.12 – Avaliação do esforço computacional com a variação do crescimento populacional.	134
Tabela 6.13 – Resumo dos resultados relativos às soluções de custo mínimo dos cenários em análise.....	135
Tabela 6.14 – Avaliação do esforço computacional com a variação da dimensão da cidade.	135

Tabela 6.15 – Resumo dos resultados relativos às melhores soluções para os cenários em análise.	136
Tabela 6.16 – Avaliação do esforço computacional com a variação da combinação de pesos	138
Tabela 6.17 – Caracterização dos novos centróides na solução de custo mínimo considerando uma cidade média, crescimento populacional de 30 % e duas densidades permitidas na expansão.	145
Tabela 6.18 – Análise da não dominância das soluções obtidas.	153

1 INTRODUÇÃO

Enquadramento do tema

A necessidade de expansão do espaço urbano pode ser justificada por diversos fatores.

Destacam-se o crescimento demográfico interno, a migração da população das zonas rurais para as zonas urbanas em busca de emprego e melhores condições de vida e/ou o aumento das necessidades dessa mesma população em termos educacionais, culturais, etc. que podem motivar, por si só, a ocupação de mais e/ou maiores parcelas de território.

A expansão da cidade implica obviamente a expansão das infraestruturas urbanísticas que a servem, pois sem um funcionamento adequado destas não é possível satisfazer as necessidades básicas dos habitantes, ficando a sua qualidade de vida seriamente comprometida.

De um modo geral, quando, pelos motivos apresentados, se torna necessário ocupar novas áreas, os responsáveis pelo planeamento e gestão dos espaços urbanos tomam decisões sobre a sua localização baseadas sobretudo nas características físicas do território e, por isso, com escassa contribuição do setor ou setores responsáveis pelas infraestruturas urbanísticas.

Quando o plano delineado é posto em prática, cada infraestrutura *per se* é chamada a dar a resposta mais adequada à escolha das áreas feita a montante.

A presente tese parte do pressuposto de que, através da formulação e resolução de um problema de otimização que por um lado considere as áreas de expansão como não conhecidas à partida e que por outro considere o traçado das infraestruturas urbanísticas de uma forma integrada, é possível identificar soluções de expansão urbana que respeitam os requisitos necessários a traçados mais económicos para as infraestruturas consideradas, em áreas de expansão que passam a ter em conta, não só as características físicas do terreno,

como toda a complexidade das infraestruturas tratadas em simultâneo e o consequente conflito de interesses que possa existir entre elas.

Este trabalho trata o problema da expansão urbana na perspetiva descrita. Considera-se que uma cidade sofre um crescimento populacional que já não pode ser absorvido no núcleo urbano existente e, portanto, é necessário decidir sobre a localização de novas áreas de expansão. Em simultâneo, são consideradas três infraestruturas, o sistema de drenagem de águas residuais, o sistema de abastecimento de água e o sistema de transportes, sendo desconhecidas as novas áreas de expansão.

O problema tratado é multiobjetivo, complexo e de grandes dimensões mesmo no caso de cidades de pequena dimensão. O modelo de apoio à decisão que o representa é de elevada complexidade, justificada em parte pela consideração integrada das três infraestruturas referidas, mas também pelo facto de se pretender que ele traduza a realidade da forma mais plausível possível. Por esta razão, o modelo em causa caracteriza-se pela não-linearidade da função objetivo e das restrições, e inclui variáveis inteiras e binárias.

A solução exata para modelos desta natureza é muito difícil de obter. No entanto, diversos métodos heurísticos não-determinísticos têm vindo a ser desenvolvidos nos últimos anos (essencialmente desde os anos 80), que permitem obter soluções aproximadas de boa qualidade (ótimas ou quase-ótimas).

O método utilizado no presente trabalho é o Recozimento Simulado. Este método tem dado bons resultados em problemas com as características daqueles que aqui são tratados. Por estar em causa um problema multiobjetivo, o método tem de ser aplicado de forma articulada com um método de aproximação à designada Fronteira de Pareto (isto é, o conjunto das soluções que não podem ser melhoradas relativamente a um dos objetivos considerados sem que piorem relativamente a outros).

Objetivos da investigação

Posto isto, descrevem-se a seguir de uma forma mais concreta e sistematizada os objetivos da investigação que deu origem à presente tese.

Assim, e de acordo com o que foi exposto anteriormente, o objetivo primordial do trabalho aqui apresentado passa pela determinação das localizações das novas áreas de expansão de uma cidade, que se consideram como uma incógnita do problema, tendo em conta a referida dinâmica e inter-relação das infraestruturas do âmbito da Engenharia Civil mais complexas em termos do dimensionamento e, porventura, as mais condicionantes dos pontos de vista técnico, económico, social e ambiental. São elas o sistema de abastecimento de água, o sistema de drenagem de águas residuais e o sistema de transportes, como já foi referido.

Pretende-se assim definir qual a melhor localização das áreas de expansão de uma cidade quando é solicitada no sentido do alargamento do seu território, identificando soluções que respeitem os requisitos necessários a traçados mais económicos para as infraestruturas consideradas, em áreas de expansão que passam a ter em conta, não só as características físicas do terreno, como toda a complexidade das infraestruturas tratadas em simultâneo e o consequente conflito de interesses que possa existir entre elas. Da análise daquelas soluções surge um conjunto de orientações que é dado a conhecer posteriormente aos responsáveis pelo planeamento e gestão dos espaços urbanos para que estes possam proceder de uma forma mais fundamentada e ponderada.

Portanto, e de uma forma efetiva, a determinação daquele conjunto de recomendações é de facto o objetivo principal do presente trabalho. No entanto, para o concretizar é necessário atingir outras metas, que se relacionam com as várias fases do trabalho desenvolvido, e que se podem classificar como objetivos secundários ou operacionais. Estes objetivos são:

- formulação de um modelo de otimização que traduza a problemática apresentada;

- aplicação de um método capaz de resolver o modelo matemático anterior, neste caso, o método do Recozimento Simulado;
- resolução e aplicação da metodologia apresentada a uma cidade hipotética;
- implementação de um programa computacional aplicando-o a um estudo de caso que considera a referida cidade hipotética.

No pressuposto de que, através da formulação e resolução de um modelo de otimização que traduza a problemática apresentada é possível identificar boas soluções de expansão urbana, um dos objetivos operacionais do trabalho é precisamente a formulação de um modelo matemático de otimização representativo da problemática descrita. Ou seja, por um lado, um modelo que considere as áreas de expansão como não conhecidas à partida e, por outro, considere os dados necessários aos traçados das infraestruturas urbanísticas em análise de uma forma conjunta.

Neste sentido, é necessário definir a função objetivo do modelo que, em consonância com o problema que se pretende resolver tem três componentes principais referentes, às três infraestruturas que se vão ter em conta.

O primeiro componente tem a ver com a minimização dos custos envolvidos na expansão do sistema de abastecimento de água, que se traduz no reforço da rede existente e a necessária ampliação para servir os novos pontos de consumo. Neste componente estão envolvidos o comprimento da rede nova de abastecimento de água que há que prever para abastecer as áreas de expansão, o comprimento de rede a reforçar (rede existente mas que necessita de ser redimensionada), e ainda uma parcela que resulta da reavaliação das alturas de elevação dos caudais de abastecimento após expansão, para continuar a garantir as pressões regulamentares na rede. Consideram-se estas três parcelas por se entenderem representar os aspetos mais

preponderantes e representativos numa análise como a que se pretende fazer no presente trabalho e com o grau de pormenor que se entende necessário nesta avaliação.

O segundo componente diz respeito à minimização dos custos envolvidos na expansão do sistema de drenagem de águas residuais, que se traduz no reforço da rede existente e a necessária ampliação para servir os novos pontos de consumo. Este componente integra o comprimento da rede nova de drenagem de águas residuais necessária para suprir as necessidades das áreas de expansão, o comprimento de rede de drenagem de águas residuais que carece de reforço e a reavaliação das alturas de elevação dos caudais de drenagem de forma a garantir as profundidades regulamentares das condutas. Utilizam-se estas três parcelas mais uma vez porque se entendem as mais representativas numa análise como a que se pretende fazer e com o grau de detalhe considerado.

O terceiro componente da função objetivo diz respeito à quantificação do investimento e despesas de manutenção e exploração relativos ao sistema de transportes aquando da sua expansão. No seu cálculo consideram-se o comprimento total de rede nova de transportes e o tempo total de viagem após a expansão da cidade. Também aqui se enumeram estas duas parcelas uma vez que, para o nível de pormenor que se pretende, se consideram bons avaliadores das soluções de expansão urbana que vão ser analisadas.

As restrições a serem incluídas no modelo matemático decorrem fundamentalmente da necessidade de garantir o bom funcionamento viário, no caso da rede de transportes, e do bom desempenho hidráulico e sanitário das redes de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais.

Formulado o modelo matemático tradutor da realidade que vai ser tratada é necessário proceder à sua resolução. Um dos objetivos operacionais ou secundários do presente trabalho

passa assim, pela utilização do método do Recozimento Simulado para resolução daquele modelo matemático. É necessário construir um algoritmo que corresponda à formulação matemática do problema e que permita a aplicação do método de resolução escolhido. O Recozimento Simulado é uma heurística que já deu provas de sucesso, conseguindo muito bons resultados quando aplicado a problemas com as mesmas características do problema aqui apresentado, um problema complexo e de grandes dimensões. Apresentar-se-ão duas formulações, a primeira relativa à aplicação do Recozimento Simulado a problemas com um só objetivo e a segunda relativa à aplicação deste a problemas multiobjetivo. A primeira, mais extensa, iniciada com a origem do método e sua analogia com o fenómeno que lhe deu origem, vai ser apresentada porque se entende de crucial importância na compreensão do método e sua aplicação. A segunda porque, de facto, o problema aqui apresentado é multiobjetivo sendo, neste caso, a aplicação do Recozimento Simulado balizada pelo conceito da Fronteira de Pareto.

Para tratar a função multiobjetivo e definir um critério de aceitação necessário para aplicar o método do Recozimento Simulado pretende-se utilizar o Método da Soma Ponderada. Este método considera uma função composta que não é mais do que, como o nome indica, a soma dos vários objetivos ponderados por coeficientes, designados por pesos. Isto é, antes de se dar início ao processo de otimização são atribuídos pesos aos objetivos representados na função objetivo em função da importância que tiverem para os decisores.

As várias combinações de pesos permitem localizar a busca por parte do algoritmo em diferentes regiões do conjunto de soluções possíveis. O método do Recozimento Simulado, pela aplicação do critério de aceitação e para cada combinação de pesos, encontra uma solução cujo valor é máximo (custo mínimo), ou está próximo do máximo. Sucessivamente, são gerados novos pesos e novas soluções (quase-) ótimas. Uma escolha criteriosa das várias

combinações de pesos permite explorar o espaço de soluções possíveis para o problema conseguindo-se uma boa aproximação à Fronteira de Pareto.

No entanto, a construção desta fronteira não faz parte dos objetivos do trabalho, por se considerar que, na prática, ela não constitui informação relevante (ou decisiva) para os decisores. Neste sentido, optou-se antes por definir quatro combinações de pesos, trabalhando-se assim em quatro regiões diferentes daquela fronteira. Uma das combinações considera pesos iguais para os três componentes da função objetivo, sendo que as outras três resultam da atribuição de um peso superior a um dos componentes, deixando os outros com pesos inferiores e iguais entre si.

Outro objetivo operacional da tese passa pela resolução e aplicação da metodologia apresentada a uma cidade hipotética. Na construção desta cidade têm de ser considerados todos os ingredientes característicos de um aglomerado urbano de forma a conseguir uma representação o mais realística possível. A concretização deste objetivo passa pela realização de duas etapas principais: a caracterização física do território, quer o território ocupado pela cidade existente, quer o que constitui as possíveis novas áreas de expansão, e a caracterização das redes existentes.

A caracterização física do território deve considerar todas as vertentes relevantes. No caso da cidade hipotética serão consideradas apenas três: permeabilidade, construindo-se um mapa de permeabilidade; exposição solar, produzindo-se um mapa de classificação da exposição solar; e inclinação, resultando um mapa de classificação de declives para a área em estudo. A informação que procede desta caracterização (independentemente do número de vertentes que considere) deve traduzir-se por um índice, aqui chamado de Índice de Aptidão.

Outra etapa que integra a construção da cidade hipotética é, como foi mencionado, a caracterização das redes existentes. Pretendem-se contemplar no modelo matemático três infraestruturas, como também já foi referido: o sistema de abastecimento de água, o sistema de drenagem de águas residuais e o sistema de transportes. Trata-se de um modelo complexo e, por isso, um dos objetivos deste trabalho passa por conseguir um compromisso entre a informação detalhada de que é necessário dispor para uma análise aprofundada do traçado e funcionamento das redes de cada infraestrutura, e a informação suficiente para a mesma análise no âmbito do planeamento do território.

De facto, quando se fazem abordagens setoriais, o nível de pormenorização é superior ao que é necessário no presente trabalho. Uma ainda maior pormenorização é também indispensável ao nível do projeto e da sua execução. São, por isso, análises com um nível de detalhe distinto da análise integrada apresentada. No entanto, acredita-se que este trabalho dará uma importante contribuição, informando, a montante do projeto, sobre a forma de tratar as várias infraestruturas quando consideradas de forma conjunta, como já se referiu.

Relativamente ao sistema de transportes e no que diz respeito à infraestrutura fixa, ou rede de transportes, consideram-se apenas as vias coletoras e distribuidoras principais. No que diz respeito aos meios de transporte, não é considerada de uma forma direta a diversidade dos veículos utilizados para a realização de viagens, sendo feita a sua agregação pela utilização do conceito de Veículo Ligeiro Equivalente (VLE).

Relativamente ao sistema de drenagem de águas residuais e, mais uma vez tendo em consideração o nível de detalhe requerido para proceder à análise proposta no presente trabalho, é considerada apenas a rede de drenagem pública incluindo coletores principais e interceptores.

No que diz respeito ao sistema de abastecimento de água, o grau de detalhe com que se trabalha contempla apenas o reservatório abastecedor e a rede geral de distribuição de água ao nível das condutas principais.

Ainda em relação a este objetivo da tese, sublinha-se uma vez mais que este trabalho não pretende substituir as abordagens setoriais, infraestrutura a infraestrutura. Com efeito, o trabalho é relevante ao nível do planeamento do território, contribuindo para uma escolha mais fundamentada das novas áreas de expansão de uma cidade, não dispensando, antes auxiliando, os estudos individuais para cada infraestrutura, que são necessários ao nível do projeto.

Por fim, o cumprimento do conjunto de objetivos delineado para a presente investigação passa pela aplicação da metodologia descrita, consumada num programa computacional, a um estudo de caso que considera a cidade hipotética referida anteriormente. Para tal tem de ser traçado um conjunto de cenários com o objetivo de analisar e compreender como se comporta uma cidade quando sujeita à necessidade de expansão do seu território e consequentemente das suas infraestruturas.

A análise aos cenários traçados é feita com base num conjunto de indicadores que se entendem pertinentes na ótica da problemática apresentada e que ao mesmo tempo se compreendem capazes de produzir informação a ser fornecida aos planeadores do território no sentido das melhores decisões.

Desta forma, os indicadores a serem considerados para avaliar e comparar soluções são: a localização de novas áreas de expansão; densidades populacionais máximas para essas áreas; e as características das infraestruturas após expansão, como sejam os comprimentos de rede nova, de rede reforçada e tempos de viagem na rede de transportes.

Com base nos resultados obtidos e nas avaliações realizadas é produzido um conjunto de informações e orientações para apoio à decisão que terá sempre por base as especificidades tidas em conta na caracterização do território de cada cidade, as combinações de pesos concretizadas na função objetivo e, por isso, no processo de otimização, e os indicadores escolhidos para balizar aquelas avaliações.

Estrutura da tese

Na sequência da definição e sistematização dos objetivos da investigação realizada, o atual documento está organizado da seguinte forma: para além deste capítulo introdutório, é constituído por mais seis capítulos. O Capítulo 2 descreve, detalhadamente, toda a problemática da expansão das infraestruturas urbanísticas, apresentando as diferentes perspetivas de análise e respetiva revisão bibliográfica. No Capítulo 3 é apresentada, em termos gerais, a metodologia adotada para abordar o problema da expansão das infraestruturas urbanísticas, que é em seguida concretizada nos Capítulos 4 e 5. Estes capítulos respeitam, respetivamente, à formulação e à resolução do modelo de apoio à decisão em que a metodologia adotada se baseia, concretizando, portanto, os primeiro e segundo objetivos operacionais definidos anteriormente. No Capítulo 6 aplica-se a metodologia a cidades hipotéticas, construídas aleatoriamente mas de forma a representarem as características essenciais das cidades reais, procedimento que corresponde ao terceiro objetivo operacional apresentado. Para tal é implementado um programa computacional que constitui o quarto objetivo, e que vai permitir analisar os resultados obtidos através da respetiva aplicação. Desta análise de resultados surge um conjunto de diretrizes e recomendações a serem dadas aos responsáveis pelo planeamento do território, em consonância com o objectivo principal do

trabalho. Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho bem como propostas para desenvolvimentos futuros.

2 A PROBLEMÁTICA DA EXPANSÃO DE INFRAESTRUTURAS URBANÍSTICAS

Crescimento urbano em Portugal e no Mundo

Várias causas podem ser apontadas para o crescimento das cidades e conseqüente necessidade de expansão das suas infraestruturas. Ao nível mundial, o crescimento demográfico e a movimentação das populações das zonas rurais para as zonas urbanas à procura de melhores condições de vida têm sido as principais razões. De facto, nos últimos tempos, as cidades tornaram-se no principal *habitat* da humanidade, constituindo a mais importante fonte de emprego e de progresso económico e social. Segundo as Nações Unidas, entre 1950 e 2005 a população urbana mais do que quadruplicou. Em 2005, cerca de 49% da população mundial vivia em zonas urbanas, ultrapassando os 50% no decurso de 2008. O fenómeno da urbanização teve, nos últimos anos, uma forte expressão, sobretudo em países em desenvolvimento – na Ásia (particularmente na China), na América Latina e em África – onde se espera que a população duplique até 2030. Em outras zonas do mundo, como a Europa e a América do Norte, a urbanização tem vindo a abrandar, desde logo porque em meados do século passado uma parcela significativa da população já vivia em aglomerados urbanos (Lee and Mastny, 2008).

No caso de Portugal, a tendência para a urbanização manifestou-se mais tarde de que em muitos outros países europeus, mas foi muito forte na segunda metade do Século XX.

Atualmente, 60% da população do país está concentrada na faixa litoral atlântica, e, nesta, cerca de 80% dos habitantes vivem em aglomerados urbanos. Desta forma, 50% da população portuguesa habita em áreas urbanas, que ocupam uns escassos 7% do total do território nacional (Antunes, 2009).

Um outro fator que pode contribuir para a expansão das cidades e conseqüente expansão das suas infraestruturas, mesmo que os fatores referidos anteriormente não se façam sentir, é a crescente necessidade, por parte dos seus habitantes de mais espaço no sentido de melhorar a sua qualidade de vida. A necessidade de alargar as redes de equipamentos coletivos quer sejam eles culturais, de educação, de saúde, desportivos ou de lazer é um exemplo que pode levar a este tipo de expansão. Neste âmbito, muitas das cidades portuguesas têm visto a sua área aumentar significativamente apesar da respetiva população não ter crescido ou até ter decrescido.

Ordenamento do território e urbanismo em Portugal

Independentemente de quais forem os motivos apontados para a expansão das cidades, é necessário ter consciência de que um crescimento urbano demasiado rápido, desordenado e sem acompanhamento, nomeadamente das infraestruturas urbanísticas, pode levar a desequilíbrios na ocupação do território e a gastos excessivos e desnecessários com a urbanização.

Estes desequilíbrios e gastos caracterizam nomeadamente o território nacional. A dispersão da edificação em Portugal verifica-se tendo sido facilitada “pelo estender das infraestruturas e pela democratização da acessibilidade criada pelo automóvel” (Carvalho, 2012).

Por outro lado, num passado recente, também contribuíram para um “crescimento urbanístico disperso e casuístico, as insuficiências na legislação urbanística” em vigor, nomeadamente os primeiros Planos Diretores Municipais (PDM). A facilidade da admissão à construção, não sujeita a condicionantes ou programação, a permissão de “iniciativas privadas dentro dos limites da respetiva propriedade e de licenciamentos dispersos e desgarrados, desde que

conformes com o PDM” são algumas das falhas apontadas a estes planos e que levaram a graves problemas na ocupação do território (Oliveira, 2004).

Assim, a dispersão na construção tem sido, nos últimos tempos, “muito discutida e considerada como indesejável, excessivamente consumidora de recursos naturais e financeiros”, fazendo com que, nos últimos anos, a Administração esteja a assumir uma posição clara no sentido de contrariar este tipo de ocupação (Carvalho, 2012).

A partir da elaboração do Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território¹, da aprovação e alteração da Lei de Bases da Política de Ordenamento do Território e Urbanismo² e do Regime Jurídico dos Instrumentos de Gestão Territorial³ foram delineados objetivos e disponibilizados instrumentos que, para além da definição, pelos PDM, das regras relativas à ocupação, uso e transformação do território, permitem aos municípios programar as várias intervenções neles previstas. Desta forma é assumido que “o limite de propriedade de cada um não é a unidade territorial apropriada para a concretização de intervenções urbanísticas racionais e integradas, donde ser fundamental incentivar os proprietários para processos associativos com vista a concretizar projetos urbanísticos de dimensão adequada a um crescimento harmonioso da urbe” (Oliveira, 2004).

Recentemente, a Lei de Bases Gerais da Política Pública de Solos, de Ordenamento do Território e de Urbanismo⁴ veio criar condições acrescidas para a reabilitação e contenção da expansão urbana como prioridades nacionais. Esta lei surge perante a necessidade de rever a

¹ Aprovado pela Lei n.º 58/2007, de 4 de setembro, retificada posteriormente pelas Declarações de Retificação n.º 80-A/2007, de 7 de setembro e n.º 103-A/2007, de 2 de novembro.

² Lei n.º 48/98, de 11 de Agosto, alterada pela Lei n.º 54/2007, de 31 de agosto.

³ Decreto-Lei n.º 380/99, de 22 de setembro, com as alterações introduzidas pelo Decreto-Lei n.º 53/2000, de 7 de abril, pelo Decreto-Lei n.º 310/2003, de 10 de dezembro, pela Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro, pela Lei n.º 56/2007, de 31 de agosto, pelo Decreto-Lei n.º 316/2007, de 19 de setembro, pelo Decreto-Lei n.º 46/2009, de 20 de fevereiro e pelo Decreto-Lei n.º 181/2009, de 7 de agosto.

⁴ Lei n.º 31/2014, de 30 de maio.

Lei de Solos⁵ e de abordar de forma conjunta as matérias já tratadas por esta e pelas constantes na, já referida, Lei de Bases da Política de Ordenamento do Território e Urbanismo. A abordagem nela contida permite obter uma visão integrada da gestão e ordenamento do território considerando o solo como recurso de base e fazendo uma requalificação do mesmo, nomeadamente do solo urbanizável. Em suma, as linhas orientadoras subjacentes aos diplomas atrás citados vêm no sentido de inverter as tendências dispersivas e de “implementar um novo modelo de ocupação territorial que permite consolidar perímetros urbanos, colmatar espaços vazios dentro dos perímetros existentes e fornecer instrumentos adequados para reforçar e revitalizar e reabilitar os centros das cidades, designadamente os centros históricos” (Oliveira, 2004).

No entanto, apesar de ser esta a realidade atual no nosso país e tendo em conta o que já foi dito anteriormente, em muitas regiões do mundo a tendência é ainda de franco crescimento e desenvolvimento. Acredita-se que quando a solução passa pela expansão das cidades, só com um planeamento e acompanhamento corretos, nomeadamente das suas infraestruturas como já foi referido, é que se consegue um crescimento equilibrado e sustentável, sendo neste contexto que se insere o presente trabalho. Contudo, não se pode deixar de referir que, apesar do presente trabalho estar direcionado para um cenário de expansão no sentido do alargamento do território de uma cidade, ele é compatível com a consideração dessas áreas de expansão no interior da cidade, se aí existir, ou passar a existir, pelas novas diretivas mencionadas atrás, solo considerado urbanizável. Neste sentido, os objetivos deste trabalho e a sua contribuição, que será explanada ao longo do documento, são igualmente válidos e relevantes para a expansão das cidades considerada nesta última situação.

⁵ Decreto-Lei n.º 794/76, de 5 de novembro.

A problemática da expansão de infraestruturas urbanas

A problemática da expansão urbana, e mais especificamente, das infraestruturas urbanas, preocupa, há muito, políticos e agentes de decisão pelo que está amplamente tratada na literatura.

Muitas vezes a expansão de infraestruturas urbanísticas é entendida e abordada apenas no âmbito do reforço, do redimensionamento e da consideração de novos componentes quando é necessária uma adaptação e reorganização das infraestruturas existentes. De facto, o acelerado crescimento dos centros urbanos sujeita as infraestruturas a um aumento de consumo, para o qual nem sempre estão preparadas. Apesar de serem dimensionadas para um determinado horizonte de projeto, por vezes o aumento rápido e inesperado da procura faz com que deixem de responder de uma forma eficiente antes do final do seu ciclo de vida, tornando-se necessária uma intervenção mais cedo do que era esperado (Bhave, 1985, Chankong *et al.*, 1981, Swamee and Sharma, 1990).

No entanto, a expansão pode incluir a consideração de novos espaços, de modo que, para além de envolver o reforço das infraestruturas urbanísticas existentes, pode também exigir a infraestruturização de novas parcelas de território, tornando-se então necessário estudar e escolher o melhor traçado e dimensionamento das respetivas infraestruturas.

Outro aspeto que é importante referir relativo ao trabalho que tem vindo a ser feito no âmbito da expansão de infraestruturas urbanísticas é que cada vez mais se faz uma abordagem à luz, não só dos aspetos técnicos e económicos, como também dos aspetos sociais e ambientais, tomando aqui especial importância a questão da urbanização sustentável (Sahely *et al.*, 2005).

De facto, tendo as cidades um papel crucial no modo de vida das populações, elas têm

obrigatoriamente de desempenhar também um papel relevante no debate sobre o futuro do planeta e sobre o desenvolvimento sustentável.

O desenvolvimento sustentável procura lidar com o dilema do avanço económico respeitando e protegendo o ambiente, promovendo a qualidade de vida para a geração presente e para as futuras. Neste âmbito, a urbanização sustentável, que faz parte deste conceito mais lato, pretende promover o funcionamento das cidades, nomeadamente das suas infraestruturas, de uma forma integrada, articulando as perspetivas económica, ambiental e social (Rasoolimanesh *et al.*, 2012).

Estes aspetos podem ser incluídos na análise do desenvolvimento urbano através da consideração de critérios e indicadores de diversas naturezas e dimensões (Hellstrom *et al.*, 2000). Normalmente, são considerados: critérios ambientais, onde são abordadas as questões do uso de recursos e a produção de resíduos, e incluem indicadores como materiais utilizados na construção, desperdícios na produção, gastos de energia e área urbanizada; critérios económicos, onde podem ser incluídos indicadores como custos de operação e manutenção e investimentos em novas tecnologias; critérios técnicos, que englobam indicadores como desempenho, capacidade e durabilidade; e critérios sociais, que têm a ver, por exemplo, com qualidade, satisfação e participação pública da população interessada (Sahely *et al.*, 2005, Lim *et al.*, 2010).

Pelo exposto, percebe-se que, quando se quer resolver um problema de expansão de infraestruturas urbanísticas, pode estar envolvida uma grande quantidade de objetivos e critérios muitas vezes conflitantes, tornando estes problemas complexos, tanto do ponto de vista do planeamento como do ponto de vista da gestão (Yuan *et al.*, 2008). Para além destes aspetos, também a existência de muitos intervenientes e interessados nestes processos, a

enorme quantidade de informação e o orçamento muitas vezes limitado não tornam fácil a sua resolução.

Os trabalhos existentes relativos à expansão de infraestruturas contemplam os aspetos referidos anteriormente, mas, em geral, consideram separadamente as diferentes infraestruturas, não tendo em conta as interações que existem entre elas, as quais só podem ser devidamente tratadas através de uma abordagem integrada.

Abordagem integrada da problemática da expansão das infraestruturas urbanas

As infraestruturas urbanísticas de uma cidade são sistemas dinâmicos e interagem em conjunto no sentido de atingir objetivos específicos, mas que muitas vezes entram em conflito, o que pode levar a comportamentos complexos, difíceis de explicar e inesperados. Reconhecendo-se esta interação entre as infraestruturas urbanísticas, no presente trabalho pretende-se resolver o problema da expansão de três infraestruturas de uma forma integrada. As infraestruturas urbanísticas consideradas são o sistema de abastecimento de água, o sistema de drenagem de águas residuais e o sistema de transportes. Trata-se das três infraestruturas do âmbito da Engenharia Civil, mais complexas em termos do dimensionamento e porventura, as mais condicionantes dos pontos de vista técnico, económico, social e ambiental. As redes de equipamentos coletivos também poderiam ser consideradas, no entanto nesta abordagem, quis-se fazer o estudo limitado às redes que estão ligadas à cidade existente não só funcional, como também estruturalmente. Com efeito, a ampliação de qualquer um dos sistemas considerados vai repercutir-se fisicamente nos sistemas existentes, pela sua substituição, reforço ou redimensionamento.

Como atrás foi mencionado, são numerosos os trabalhos existentes que tratam separadamente cada infraestrutura, podendo ser dados exemplos na área dos transportes (Jajac *et al.*, 2009,

Cervero, 2003), na área dos sistemas de abastecimento de água (Farmani *et al.*, 2005, Jin *et al.*, 2008, Rodrigues *et al.*, 2011, Cheung *et al.*, 2003a) e na área dos sistemas de drenagem de águas residuais (Ong and Adams, 1990, Chang and Hernandez, 2008). Estas abordagens setoriais são indispensáveis ao nível do projeto e da sua execução. São, por isso, análises com um nível de pormenorização superior ao da análise integrada a que se propõe o presente trabalho. No entanto, acredita-se que este dará uma importante contribuição, informando, a montante do projeto, sobre a forma de tratar as várias infraestruturas quando consideradas de forma conjunta.

Por outro lado, na abordagem proposta neste trabalho e como já foi dito, não se consideram conhecidas nem selecionadas as áreas de expansão, antes se incluem como variáveis no modelo de apoio à decisão construído para resolução do problema. Desta forma, a escolha das referidas áreas terá não só em conta os aspetos que caracterizam fisicamente o território como todos os objetivos considerados na formulação do problema no sentido de se atingirem traçados económicos para as três infraestruturas em simultâneo. Põem-se, assim, em evidência as interações e conflitos de objetivos entre as várias infraestruturas, e acredita-se que a solução resultante da resolução de um problema formulado desta forma resultará num conjunto de áreas de expansão que serão o reflexo de todos os requisitos considerados.

A exceção que conhecemos relativamente ao tratamento das diferentes infraestruturas de forma separada é a denominada Análise de Limiares. Esta abordagem de planeamento do território, que foi desenvolvida por Boleslaw Malisz nos anos 1960 e 1970 (Malisz, 1972) e aplicada em Portugal por Santos (1985), está pormenorizadamente descrita em Kozlowski (1986). A principal fragilidade que lhe é apontada, e que está certamente na origem da sua escassa utilização, é a de visar exclusivamente a minimização dos custos de urbanização (incluindo infraestruturas). Essa fragilidade é ultrapassada pela metodologia proposta nesta

tese, a qual permite considerar objetivos múltiplos. Para além disso, nesta tese apresenta-se um método de apoio à decisão baseado em um algoritmo de Recozimento Simulado que permite determinar soluções (quase-) ótimas de forma sistemática, ao invés do método de tentativa-e-erro que caracteriza os trabalhos realizados através da Análise de Limiares.

Para concluir este capítulo, sublinha-se uma vez mais que este trabalho não pretende substituir as abordagens setoriais, infraestrutura a infraestrutura. Com efeito, o trabalho é relevante ao nível do planeamento, pela produção de um conjunto de linhas orientadoras, contribuindo, como já se disse, para uma escolha mais fundamentada das novas áreas de expansão de uma cidade e não dispensa (antes complementa) os estudos individuais para cada infraestrutura, que são necessários ao nível do projecto.

3 METODOLOGIA DE ANÁLISE DA EXPANSÃO DE INFRAESTRUTURAS URBANÍSTICAS

A problemática exposta no capítulo anterior é complexa e de difícil resolução, por isso, torna-se necessário encontrar uma metodologia de análise que permita o acompanhamento da expansão urbana, mais propriamente das infraestruturas urbanas, de uma forma clara e sistemática.

Só desta forma é possível a apresentação de soluções que salvaguardem as próprias cidades de um crescimento desordenado e nefasto, as populações e o seu bem-estar, e que auxiliem políticos e agentes de decisão a tomar posições defensáveis e transparentes.

Caracterização do problema

O primeiro aspeto que é necessário entender quando se pretende resolver um problema desta natureza é a sua motivação. De facto, a expansão de uma cidade e das suas infraestruturas pode ser despoletada por variados fatores. Na maioria dos casos, a principal causa apontada é o crescimento demográfico, motivado ele também por diversos aspetos. Mas outras podem existir, como por exemplo, a necessidade de mais espaços verdes, de mais espaços de lazer, de mais zonas para indústria, etc.

Ao fazer-se o levantamento das causas que levam à necessidade de expansão das infraestruturas urbanas é imprescindível compreender igualmente quais os objetivos que se querem atingir ao intervir. Só assim se poderá ter uma ideia mais clara de quais as dificuldades e restrições que se poderão encontrar para posteriormente se avaliar quais as melhores decisões a tomar. Este é o passo que dá início à metodologia de análise descrita neste capítulo e que está representada na Figura 3.1.

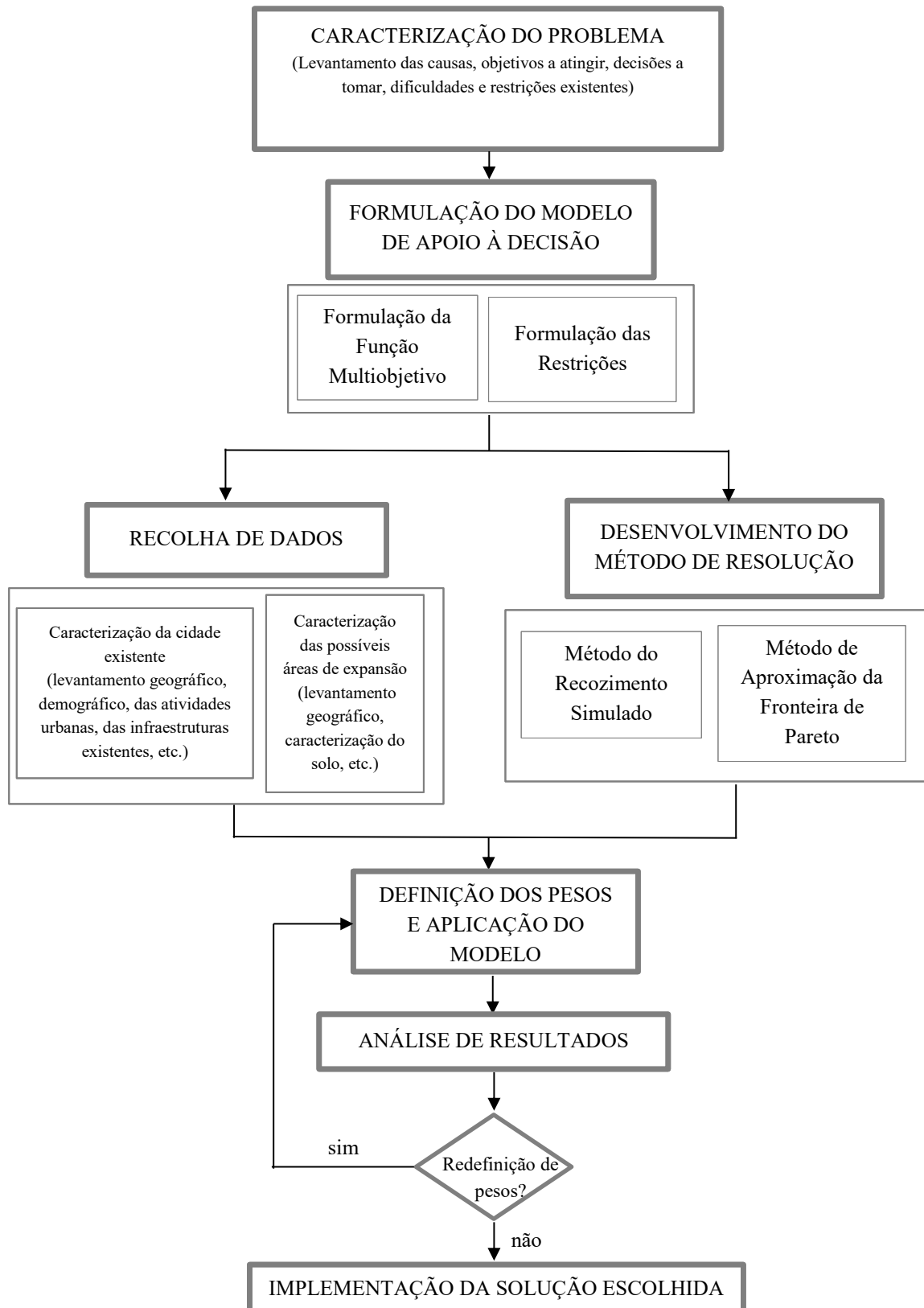


Figura 3.1 – Metodologia de análise.

Formulação do modelo de apoio à decisão

A consideração em simultâneo das três infraestruturas referidas no capítulo anterior e o tratamento das localizações dos novos pontos de consumo como incógnitas tornam o problema bastante complexo e de grandes dimensões, como já se referiu.

Por isso, e pretendendo-se, também como já se disse, fazer uma análise transparente, sistemática e interativa, constrói-se um modelo de apoio à decisão que é constituído pelo modelo matemático representativo do problema.

Para construção daquele modelo matemático utiliza-se um conjunto de ferramentas, disponibilizadas pela Investigação Operacional, sendo aquele traduzido num modelo decisional de otimização onde constam, naturalmente, dois componentes: a função objetivo e o conjunto de restrições.

Nesta construção e, devido à complexidade do problema, têm de ser tomadas providências para que o modelo não seja muito pormenorizado, facto que poderia inviabilizar a sua resolução, nem demasiado simplificado, correndo-se o risco de perder o realismo.

Recolha de dados

Para abordar os problemas de planeamento de infraestruturas urbanísticas de uma forma integrada e implementar o modelo de apoio à decisão, é naturalmente necessário efetuar um estudo criterioso da cidade existente em todos os aspetos que lhe são inerentes e característicos. Para tal, tem de ser realizado um levantamento geográfico, começando por se entender a sua configuração espacial, quer em termos de planimetria, quer em termos de altimetria.

Concomitantemente, é necessário conhecer a distribuição da população pela área em estudo, assim como a distribuição territorial do emprego nessa área, pois é da interação entre os locais

de residência e de atividade da população que resultam as necessidades de mobilidade a satisfazer.

Os fatores referidos anteriormente influenciam, também de forma direta, a disposição e organização das infraestruturas, indispensáveis para suprir as necessidades da população.

Assim, é essencial fazer uma caracterização exaustiva das infraestruturas existentes, percebendo o seu traçado, dimensionamento, estado de conservação, o seu funcionamento e interação.

Depois de caracterizada a cidade, outro aspeto que é fundamental analisar é se esta, no espaço que ocupa, consegue, responder às novas solicitações. Se assim for, será necessário apenas prever a reorganização, o redimensionamento ou o reforço das infraestruturas existentes. Caso contrário, têm também de ser previstas áreas de expansão, normalmente na periferia da cidade existente (desde que nesta existam zonas com condições adequadas para ocupação urbana).

Consequentemente, à semelhança do que deve ser feito para a cidade, tem de se proceder a um levantamento geográfico das possíveis áreas de expansão, fazendo-se uma caracterização da adequabilidade daquelas à construção, caracterizando o terreno, nomeadamente a sua inclinação, exposição solar, geologia, vegetação, etc. Desta forma, perceber-se-á qual a aptidão dessas áreas para os diferentes tipos de utilização do solo: habitação, indústria, comércio, lazer, etc.

É importante perceber ainda se, na área considerada para a expansão da cidade, existem terrenos cuja utilização seja proibida ou esteja condicionada por integrarem reservas agrícolas ou ecológicas ou pertencerem a zonas de proteção do património construído ou arqueológico.

Desenvolvimento do método de resolução

Como também já foi referido no capítulo anterior e pelo que tem vindo a ser exposto, a função objetivo contempla vários objetivos. As expressões envolvidas naquela função são não lineares, e envolvem variáveis inteiras e binárias, o mesmo acontecendo ao nível das restrições.

A escolha do método de resolução está estreitamente relacionada com as características do problema em análise e o conseqüente modelo representativo do mesmo.

Assim, querendo-se resolver o modelo com todo o realismo, os métodos clássicos deixam de ser eficazes, sendo necessário recorrer a métodos modernos de otimização global, nomeadamente de tipo heurístico, que tiram partido do desenvolvimento dos meios computacionais e conseqüente aumento das capacidades de cálculo.

A principal característica das heurísticas modernas é que permitem, na procura da solução ótima, movimentos de uma dada solução para uma solução pior, pertencente à sua vizinhança. Esta propriedade faz com que, ao contrário das heurísticas clássicas, a procura da solução não fique bloqueada num ótimo local distante do ótimo global.

Nas últimas décadas têm sido propostos muitos tipos de heurísticas modernas, como por exemplo Algoritmos Genéticos, Recozimento Simulado, Pesquisa Tabu, Entropia Cruzada, Colónia de Formigas e “Particle Swarm”, muitos deles inspirados em fenómenos naturais. Em geral, todos estes métodos podem ser aplicados com bons resultados, em termos de valor das soluções a que permitem chegar e do tempo de cálculo para a respetiva determinação, desde que devidamente implementados (ou seja, desde que os respetivos parâmetros sejam devidamente calibrados).

O método utilizado neste trabalho é o Recozimento Simulado. É um método com uma forte componente aleatória que, devido às suas características, sob determinadas condições, tende a

convergir assintoticamente para a solução ótima (Aarts and Korst, 1989, Aarts and Van Laarhoven, 1985).

Cada solução candidata para o problema resulta de uma pequena alteração da solução corrente. Se o valor da solução candidata (em termos da função objetivo) for superior ao da solução corrente então aquela solução é imediatamente aceite, tornando-se a solução corrente. De contrário, ela é aceite de acordo com uma dada probabilidade. Este critério de aceitação (ou não) de soluções é o denominado critério de Metropolis. Através da aplicação deste critério fica garantido que a solução corrente converge para uma solução ótima global (entre as heurísticas modernas, o Recozimento Simulado é o único método para o qual esta propriedade de convergência está demonstrada).

Definição dos pesos, análise de resultados e implementação da solução

Como já foi referido, um problema multiobjetivo não apresenta uma solução única, mas sim um conjunto de soluções que constituem a Fronteira de Pareto. Por esta razão, o método de resolução utilizado tem de prever a articulação do algoritmo do Recozimento Simulado com um método de aproximação daquela fronteira. Numa primeira fase é escolhida a forma como se geram as combinações de pesos que afetam os diferentes componentes da função objetivo, tradutores da importância que se dá a cada um, em cada conjunto de análises realizado. No final do processo obtém-se o já referido conjunto de soluções que têm a característica de ser não dominadas, isto é, não podem ser melhoradas relativamente a nenhum dos objetivos considerados sem piorarem relativamente aos demais.

Daquele conjunto de soluções alternativas, os agentes de decisão escolhem e implementam a solução que consideram mais eficiente aquando do momento de tomada de posição.

4 MODELO DE APOIO À DECISÃO PARA EXPANSÃO DE INFRAESTRUTURAS URBANÍSTICAS

4.1 Introdução

O modelo de apoio à decisão apresentado neste capítulo permite representar de forma sistemática e integrada os problemas relativos à expansão de infraestruturas urbanísticas expostos nos capítulos anteriores. Pretende-se fazer uma análise metódica e clara destes problemas, defensável, se for o caso, perante políticos e agentes de decisão, tomando em conta que a sociedade civil, cada vez mais, reivindica processos transparentes e convenientemente fundamentados.

Assim, a análise estratégica da expansão dos sistemas urbanos de drenagem de águas residuais, de distribuição de água e de transportes é traduzida num modelo decisional de otimização constituído pela função objetivo, neste caso multiobjetivo como já foi referido, e pelo conjunto de restrições.

Esquemáticamente um modelo de otimização multiobjetivo, incluindo m variáveis de decisão $\mathbf{X}=(x_1, x_2, \dots, x_m)$ e n objetivos $f_i(\mathbf{X})$ ($i=1,2, \dots, n$) pode ser escrito da seguinte forma (Deb, 2001):

$$\min \mathbf{F}(\mathbf{X}) = (f_1(\mathbf{X}), f_2(\mathbf{X}), \dots, f_n(\mathbf{X})) \quad (4.1)$$

sujeito a:

$$g_i \begin{cases} \leq \\ = \\ \geq \end{cases} 0, \forall i = 1, 2, \dots, k$$

em que:

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_m) \in \Omega \subseteq \Omega_1 \times \Omega_2 \times \dots \times \Omega_m;$$

$$x_i \in \Omega_i, \forall i = 1, 2, \dots, m;$$

Ω é o conjunto de soluções possíveis da função $\mathbf{F}(\mathbf{X})$.

A função multiobjetivo que reflete, como o próprio nome indica, os objetivos do problema, contempla no caso em estudo a minimização das funções de custo relacionadas com o investimento no reforço e ampliação das três infraestruturas referidas e com a respetiva operação.

As restrições, por sua vez, podem representar limitações ou considerações de ordem física, económica, tecnológica, jurídica, política, etc. Para o problema em análise decorrem fundamentalmente da necessidade de garantir o bom funcionamento viário, no caso da rede de transportes, e do bom desempenho hidráulico e sanitário das redes de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais.

Pretendendo-se construir um modelo o mais verosímil possível, a função objetivo, para além de contemplar múltiplos componentes devido à complexidade do problema, apresenta características de não linearidade, o mesmo acontecendo ao nível das restrições. Razões que justificam ainda a existência de variáveis inteiras e binárias envolvidas no modelo matemático. Para isto contribui igualmente o facto de se considerar neste trabalho que o crescimento populacional a que a cidade fica sujeita, já não consegue ser absorvido por esta

sendo a sua expansão entendida não só como o reforço ou redimensionamento das infraestruturas que a servem mas também como a sua ampliação. Ampliação esta que se faz sobre a área contígua à cidade, sendo aí localizadas as novas áreas de expansão. A localização destas, não é conhecida à partida, constituindo por isso mais uma variável no modelo matemático.

4.2 Construção do Modelo Matemático

Para a formulação do modelo matemático que traduza o problema, torna-se necessário antes de mais construir um modelo gráfico ou grafo que represente a estrutura física que se quer estudar, a cidade. Este modelo deve possibilitar a representação de todas as vertentes que a caracterizam e que lhe são inerentes. De facto, uma cidade é exemplo de um sistema que pode ser abstratamente considerado como um conjunto de elementos que se relacionam entre si, sendo, por isso, facilmente representada por um grafo. Na sua representação, articulam-se dois elementos fundamentais, os nós e os arcos. Associando a este grafo uma outra estrutura (ou várias) que, da forma mais conveniente, traduza as grandezas associadas a nós e/ou arcos obtém-se uma rede. As redes permitem representar em modelo, um determinado problema tendo como grande vantagem a representação visual. Com efeito, os grafos podem ser representados graficamente por círculos (representando os nós) e segmentos de reta ligando esses pontos (representando os arcos) (Rodrigues, 1999).

No contexto do trabalho apresentado, é criado um grafo onde se representam os centróides como sendo nós que coincidem com os centros geométricos de uma determinada zona integrante da cidade ou das áreas previstas para expansão, podendo, por exemplo, reproduzir um bairro ou um conjunto de bairros. Por seu lado, os arcos representam as possibilidades de

localização das infraestruturas por onde circulam os fluxos de pessoas, bens e desperdícios entre os centróides (Figura 4.1).

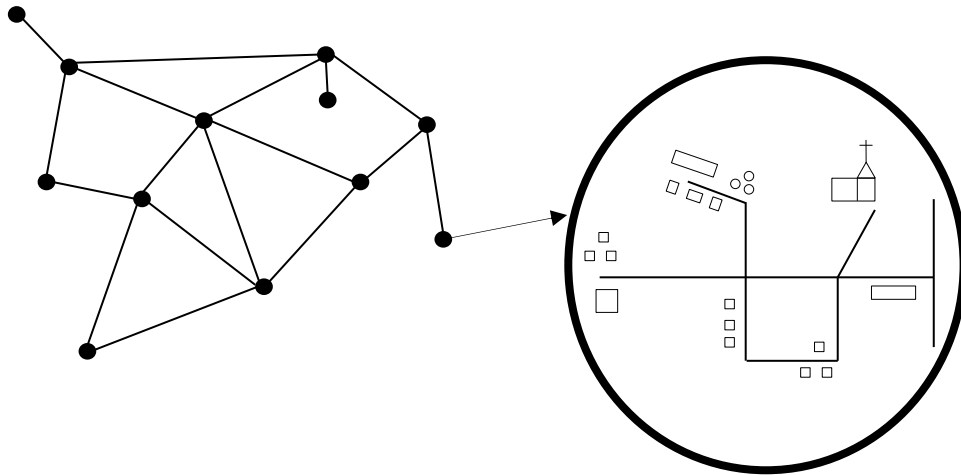


Figura 4.1 – Grafo representativo da cidade, com pormenor de um nó representativo de um centróide enquanto bairro ou conjunto de bairros.

4.2.1 Função Objetivo

A função objetivo do problema em estudo engloba três componentes ou objetivos principais relacionados com o redimensionamento e ampliação das três infraestruturas estudadas.

Assim, sendo:

C – conjunto de todos os centróides (os pertencentes à cidade existente e os representativos das novas áreas de expansão)

N – conjunto dos centróides representativos das novas áreas de expansão

NA – conjunto de todos os nós constituintes da rede de abastecimento

ND – conjunto de todos os nós constituintes da rede de drenagem

NT – conjunto de todos os nós constituintes da rede de transportes

DA – conjunto dos diâmetros comerciais para abastecimento de água

DD – conjunto dos diâmetros comerciais para drenagem de águas residuais

os três componentes da função objetivo podem ser traduzidos da seguinte forma:

$$\min f_A(C_A, C_{AR}, E_A) = \min f_A(\sum_{i,j \in NA} L_{Aij} \times x_{ij}, D_{popn}, \sum_{i,j \in NA} L_{Aij} \times y_{ij}, \sum_{i,j \in NA} Q_{Aij} \times H_{Aj}, D_{aij}) \quad (4.2)$$

$$\min f_D(C_D, C_{DR}, E_D) = \min f_D(\sum_{i,j \in ND} L_{Dij} \times z_{ij}, D_{popn}, \sum_{i,j \in ND} L_{Dij} \times w_{ij}, \sum_{i,j \in ND} Q_{Dij} \times H_{Dij}, D_{aij}) \quad (4.3)$$

$$\min f_T(C_T, T) = \min f_T(\sum_{i,j \in NT} L_{Tij} \times k_{ij}, D_{popn}, V_{ij}, \sum_{i,j \in NT} TV_{ij}) \quad (4.4)$$

O primeiro objetivo diz respeito aos custos envolvidos na expansão da rede de abastecimento de água, que se traduz no reforço da rede existente e a necessária ampliação para servir os novos pontos de consumo. Assim, f_A quantifica a função de custo relacionada com o investimento, manutenção e operação da rede de distribuição de água aquando da sua expansão.

$$f_A = C_A + C_{AR} + E_A = \sum_{i,j \in NA} L_{Aij} \times x_{ij} + \sum_{i,j \in NA} L_{Aij} \times y_{ij} + \sum_{i,j \in NA} Q_{Aij} \times H_{Aj} \quad (4.5)$$

C_A diz respeito ao comprimento total de rede de abastecimento nova, C_{AR} diz respeito ao comprimento total de rede reforçada e E_A resulta da reavaliação das alturas de elevação dos caudais de abastecimento de forma a garantir as pressões regulamentares na rede.

As variáveis de decisão consideradas na avaliação da função de custo f_A são as seguintes:

L_{Aij} – comprimento da conduta de distribuição de água que liga o nó i ao nó j

D_{popn} – densidade populacional atribuída à nova zona de expansão $n \in N$

Q_{Aij} – caudal de abastecimento de água transportado desde o nó i ao nó j (depende da distribuição da população e da D_{popn})

D_{aij} – diâmetro da conduta que transposta a água de abastecimento desde o nó i ao nó j escolhido no conjunto D_A

H_{Aj} – altura de elevação necessária, para assegurar, no nó j , as pressões regulamentares

x_{ij} – variável binária igual a 1 se existe uma conduta nova de distribuição de água a ligar o nó i ao nó j , ou igual a 0, caso contrário

y_{ij} – variável binária igual a 1 se existe uma conduta de distribuição de água reforçada a ligar o nó i ao nó j , ou igual a 0, caso contrário.

O segundo objetivo tem a ver com a minimização dos custos envolvidos na expansão da rede de drenagem de águas residuais. Mais uma vez, prevendo-se o reforço da rede existente e a sua ampliação devido ao crescimento populacional, f_D é a função de custo que quantifica os valores relacionados com o investimento, manutenção e operação da rede de drenagem de águas residuais.

$$f_D = C_D + C_{DR} + E_D = \sum_{i,j \in ND} L_{Dij} \times z_{ij} + \sum_{i,j \in ND} L_{Dij} \times w_{ij} + \sum_{i,j \in ND} Q_{Dij} \times H_{Dij} \quad (4.6)$$

C_D diz respeito ao comprimento total de rede de drenagem nova, C_{DR} diz respeito ao comprimento total de rede reforçada e E_D resulta da reavaliação das alturas de elevação dos caudais de drenagem de forma a garantir as profundidades regulamentares das condutas.

As variáveis de decisão envolvidas na sua avaliação são as seguintes:

L_{Dij} – comprimento da conduta de drenagem de águas residuais, que liga o nó i ao nó j

Q_{Dij} – caudal drenado desde o nó i até ao nó j (depende da distribuição da população e da D_{popn})

D_{dij} – diâmetro da conduta que transposta as águas residuais desde o nó i até ao nó j escolhido no conjunto D_D

H_{Dij} – altura de elevação necessária para assegurar as disposições regulamentares na conduta que liga os nós i e j

z_{ij} – variável binária igual a 1 se existe uma conduta nova de drenagem de água, a ligar o nó i ao nó j , ou igual a 0, caso contrário

w_{ij} – variável binária igual a 1 se existe uma conduta reforçada de drenagem de água a ligar o nó i ao nó j , ou igual a 0, caso contrário.

O terceiro componente considerado na função objetivo, f_T , representa a função de custo que traduz o investimento, manutenção e exploração relativos à rede de transportes aquando da sua expansão. C_T diz respeito ao comprimento total de rede de transportes nova e T diz respeito ao tempo total de viagem.

$$f_T = C_T + T = \sum_{i,j \in NT} L_{Tij} \times k_{ij} + \sum_{i,j \in NT} TV_{ij} \quad (4.7)$$

No seu cálculo as variáveis de decisão envolvidas são as seguintes:

L_{Tij} – comprimento do eixo que pertence à rede de transportes que liga o nó i ao nó j

V_{ij} – fluxo de tráfego no eixo que liga o nó i ao nó j (função de D_{popn})

TV_{ij} – tempo de viagem relativo ao eixo que liga o nó i ao nó j (função de $V_{i,j}$)

k_{ij} – variável binária igual a 1, se existe um eixo novo a ligar o nó i ao nó j , ou igual a 0, caso contrário.

É de referir que relativamente às três infraestruturas e às respetivas parcelas consideradas na quantificação da função objetivo, tem-se em mente não só a avaliação do traçado e dimensionamento das redes, como também a avaliação do nível de serviço que aquelas prestam à população, pretendendo avaliar se aquele é adequado à procura. Por exemplo, relativamente à infraestrutura de abastecimento de água, esse nível de serviço passa por garantir as pressões máximas e mínimas desejáveis na rede traçada. Já em relação à infraestrutura dos transportes o nível de serviço é medido pelo tempo passado na rede de transportes, correspondendo um tempo menor a um incremento na função de custo.

4.2.2 Restrições

- **Restrições de continuidade**

As restrições de continuidade garantem o equilíbrio do sistema em termos de afluência e saída de fluxos nos nós pertencentes às infraestruturas em questão.

$$\sum_{j \in NA} Q_{Aji} - Q_{Aij} = QA_i, \forall i \in C \quad (4.8)$$

Estas restrições garantem o abastecimento de água, QA_i , aos centróides.

$$\sum_{j \in NA} Q_{Aji} - Q_{Aij} = 0, \forall i \in NA - C \quad (4.9)$$

Estas equações dizem respeito aos nós intermédios (que não representam centróides) pertencentes à rede de abastecimento.

$$\sum_{j \in ND} Q_{Dji} - Q_{Dij} = -QDi, \forall i \in C \quad (4.10)$$

Estas restrições dizem respeito ao caudal residual, QDi , produzido nos centróides.

$$\sum_{j \in ND} Q_{Dji} - Q_{Dij} = 0, \forall i \in ND - C \quad (4.11)$$

Estas equações dizem respeito aos nós intermédios pertencentes à rede de drenagem.

$$\sum_{j \in NT} V_{ji} = VE_i, \forall i \in NT \quad (4.12)$$

Estas restrições dizem respeito ao tráfego, VE_i , que afluí aos nós pertencentes à rede de transportes.

$$\sum_{i \in NT} V_{ij} = -VS_j, \forall j \in NT \quad (4.13)$$

Estas restrições dizem respeito ao tráfego, VS_i , que sai dos nós pertencentes à rede de transportes.

- **Restrições de capacidade**

Estas restrições permitem balizar os valores dos fluxos nas redes.

$$Q_{Aij} \leq Q_{Amáxij}, \forall i, j \in NA \quad (4.14)$$

Nestas equações, relativas à rede de abastecimento de água, os valores são definidos de acordo com a legislação em vigor.

$$Q_{Dmínij} \leq Q_{Dij} \leq Q_{Dmáxij}, \forall i, j \in ND \quad (4.15)$$

Nestas equações, relativas à rede de drenagem, os valores são definidos de acordo com a fórmula de Manning-Strickler tendo em conta os valores regulamentares para os diâmetros, inclinações e velocidades de escoamento.

$$V_{ij} \leq \phi_{máxij}, \forall i, j \in NT \quad (4.16)$$

Estas restrições são relativas à capacidade máxima, $\phi_{máxij}$ permitida em cada eixo pertencente à rede de transportes.

$$D_{pop_i} \leq D_{popmáx_i}, \forall i \in N \quad (4.17)$$

Estas restrições dizem respeito ao cumprimento da densidade populacional máxima,

$D_{popmáx_i}$, permitida nas áreas previstas para a expansão, aquando da atribuição de população.

- **Restrições de não negatividade e integralidade**

Estas restrições definem o domínio das diferentes variáveis de decisão envolvidas no modelo.

$$Q_{A_{ij}}, H_{A_{ij}}, Q_{A_{máxij}} \geq 0, \forall i, j \in NA \quad (4.18)$$

$$Q_{D_{ij}}, H_{D_{ij}}, Q_{D_{mínij}}, Q_{D_{máxij}} \geq 0, \forall (i, j) \in ND \quad (4.19)$$

$$D_{pop\ i}, D_{pop\ máx\ i} \geq 0, \forall i \in N \quad (4.20)$$

$$x_{ij}, y_{ij}, w_{ij}, z_{ij}, k_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in \{NA \cup ND \cup NT\} \quad (4.21)$$

5 MÉTODO DE RESOLUÇÃO DO MODELO DE APOIO À DECISÃO

5.1 Introdução

O modelo matemático que traduz o problema que se pretende resolver neste trabalho é, como foi apresentado no capítulo anterior, complexo e de grandes dimensões. Uma das suas principais características é ter objetivos múltiplos, o que faz com que na sua resolução não se procure uma solução global única que satisfaça todas as restrições otimizando um só objetivo mas um conjunto de soluções que visando preservar a diversidade do problema consiga otimizar cada um dos objetivos definidos.

O conjunto de soluções de um problema multiobjetivo é designado por Fronteira de Pareto pois uma das primeiras noções de ótimo, no âmbito deste tipo de otimização é da responsabilidade de Vilfredo Pareto (Pareto, 1896). Este apresentou uma definição baseada na convicção intuitiva de que um ponto é tomado como ótimo se “nenhum critério utilizado pode melhorar a solução, sem piorar pelo menos um outro critério”. Assim, este conceito não nos fornece, como solução de um problema multiobjetivo, uma solução única, mas um conjunto de soluções, designadas por soluções não dominadas. Sendo que, por definição em cada uma daquelas soluções o melhoramento de um objetivo é conseguido em detrimento de outro, estando, desta forma, a escolha da solução ótima vinculada aos responsáveis pelas tomadas de decisão (Zitzler *et al.*, 2003, Deb, 2001, Antunes *et al.*, 2012).

Para uma melhor compreensão e sistematização destes conceitos apresentam-se seguidamente algumas definições que se entendem fundamentais para a compreensão do presente trabalho.

Sendo $F(X)$ uma função multiobjetivo e Ω o conjunto de soluções possíveis dessa função, tem-se (Deb, 2001):

- Definição 1 **Dominância de Pareto**

$\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_k)$ domina $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_k)$ ($\mathbf{u} < \mathbf{v}$) se e só se:

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, k\}: u_i \leq v_i \quad (5.1)$$

e

$$\exists i \in \{1, 2, \dots, k\}: u_i < v_i.$$

- Definição 2 **Ótimo de Pareto ou solução eficiente** (espaço das variáveis de decisão)

Diz-se que uma solução $X \in \Omega$ é um ótimo de Pareto se e só se:

$$\neg \exists X' \in \Omega: F(X') < F(X).$$

- Definição 3 **Solução não dominada** (espaço dos objetivos)

Diz-se que $F(X)$ é uma solução não dominada se e só se X é um ótimo de Pareto.

- Definição 4 **Conjunto dos Ótimos de Pareto – P**

$$P = \{X \in \Omega \mid \neg \exists X' \in \Omega: F(X') < F(X)\}.$$

- Definição 5 **Fronteira de Pareto – FP**

$$FP = \{F(X) \mid X \in P\}.$$

A complexidade do modelo matemático apresentado advém não só da consideração de múltiplos objetivos, mas também de se pretender que ele traduza de forma suficientemente rigorosa a realidade que representa. As expressões nele envolvidas apresentam, por isso, características de não linearidade, contemplando variáveis inteiras e binárias.

Para modelos desta natureza desconhece-se, muitas vezes, uma resolução analítica. No entanto, o desenvolvimento das técnicas computacionais tem permitido a utilização de métodos não determinísticos – as heurísticas - na obtenção de soluções.

Estes métodos integram técnicas de busca baseadas em processos inspirados em fenómenos naturais (genética de populações, aquecimento de metais, etc.), que trabalham com um conjunto de soluções potenciais, que competem entre si, durante o processo de resolução, em direção à solução ótima. Estes métodos, de busca heurística, têm recebido crescente interesse nas últimas décadas, devido principalmente à sua simplicidade concetual e versatilidade na resolução de problemas reais, factos facilitados, como já se referiu, pelo grande desenvolvimento das técnicas computacionais que têm mostrado resultados muito satisfatórios.

Dependendo do processo natural em que são baseadas, da forma como trabalham a função multiobjetivo, da forma como fazem a transformação do problema multiobjetivo num problema com um único objetivo, das técnicas específicas utilizadas para tratamento das restrições, se é considerado ou não o critério de dominância para aproximação à Fronteira de Pareto, etc., assim são classificadas as heurísticas, existindo, por isso, uma grande diversidade que torna difícil a sua catalogação (Veldhuizen and Lamont, 2000, Marler and Arora, 2004).

Quando baseadas especificamente, em mecanismos de evolução na área da genética, são muitas vezes designadas por Algoritmos Evolucionários (Coello *et al.*, 2007), dos quais os bem conhecidos Algoritmos Genéticos são exemplo.

O interesse inicial pelos métodos heurísticos deu-se por volta de 1950, com o aparecimento daqueles algoritmos, quando biólogos começaram a utilizar técnicas computacionais para a simulação de sistemas biológicos. Mais tarde, Goldberg (1989), com o seu livro “Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning”, fez com que os Algoritmos Genéticos se tornassem populares, de tal modo que, tanto tempo passado, esta seja uma das abordagens mais pesquisadas e empregues para a resolução de problemas de otimização.

O primeiro Algoritmo Genético multiobjetivo, denominado VEGA – Vector Evaluated Genetic Algorithm, foi proposto por Schaffer (1984). A partir deste, inúmeros Algoritmos Evolucionários, baseados em Algoritmos Genéticos, foram desenvolvidos. Deixam-se alguns dos mais utilizados: MOGA – Multi-objective Genetic Algorithm (Fonseca and Fleming, 1993), NPGA – Niche Pareto Genetic Algorithm (Horn *et al.*, 1994), NSGA – Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (Srinivas and Deb, 1995), SPEA – Strength Pareto Evolutionary Algorithm (Zitzler and Thiele, 1999) e NSGAI – Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (Deb *et al.*, 2002).

No âmbito, por exemplo, das infraestruturas hidráulicas, podem citar-se trabalhos como os de Dandy and Englhard (2001) que utilizaram o MOGA, Cheung *et al.* (2003a) que fizeram um estudo comparativo entre o MOGA e o SPEA, Jin *et al.* (2008) e Cheung *et al.* (2003b) que utilizaram o NSGAI e o SPEA respetivamente, na resolução de problemas de reabilitação de redes de abastecimento de água.

Mas outras heurísticas baseadas igualmente em mecanismos evolutivos têm vindo a fazer a sua extensão a problemas multiobjetivo. São exemplos a Busca Tabu (Hertz *et al.*, 1994), as

Colónias de Formigas (Doerner *et al.*, 2006), o Recozimento Simulado, etc. Este último, o Recozimento Simulado, é o utilizado no presente trabalho. Este método inspira-se num processo físico, da área da Termodinâmica, o Recozimento, como será descrito mais adiante. O Recozimento Simulado, como técnica de otimização, tem sido aplicado com sucesso a muitos domínios. Por exemplo, na área dos sistemas de abastecimento de água podem citar-se os trabalhos de Marryott *et al.* (1993), Cunha (1999), Cunha and Sousa (2001), Sousa (2006), Cunha and Sousa (2010), e na área dos sistemas de drenagem de águas residuais, os trabalhos de Sousa *et al.* (2002) e Zeferino *et al.* (2009).

A extensão desta abordagem à otimização multiobjetivo foi inicialmente explorada por Serafini (1992) e por Ulungu *et al.* (1999) que desenvolveram um dos mais populares algoritmos multiobjetivo baseado no Recozimento Simulado, o MOSA (Multiobjective Simulated Annealing). Entretanto outros trabalhos têm surgido utilizando o Recozimento Simulado em problemas multiobjetivo. Na área dos sistemas de drenagem de águas residuais pode ser referido o trabalho de Zeferino (2011), na área dos sistemas de abastecimento de água, o trabalho de Marques (2013), e na área dos sistemas de transportes, o trabalho de Tuytens *et al.* (2003). Estes autores utilizam com sucesso o Recozimento Simulado em problemas com características idênticas às do problema que é tratado nesta tese.

No Subcapítulo 5.2 é feita uma descrição do método do Recozimento Simulado no âmbito de aplicação a problemas com um só objetivo. Esta exposição entende-se fundamental para a compreensão da sua extensão a problemas multiobjetivo que será apresentada no Subcapítulo 5.3.

5.2 O Método do Recozimento Simulado para um Problema com um Objetivo

5.2.1 Origem do Método

Para introduzir o método do Recozimento Simulado é importante começar por fazer a distinção entre este e o método heurístico mais simples e bem conhecido, o método de Busca Local. Na literatura, por vezes, considera-se o Recozimento Simulado como uma extensão desta técnica.

O método de Busca Local parte de uma configuração ou solução inicial para o modelo representativo do problema que se pretende resolver e vai gerando novas configurações ou soluções por alteração da anterior. Como qualquer método de otimização, trabalha sobre um modelo decisional constituído por uma função de custo que é função das variáveis do problema e que terá de respeitar as restrições do sistema que está a ser otimizado.

Assim, o método de Busca Local apenas requer a definição de um esquema de vizinhança (geração de novas soluções) e uma forma de avaliação do custo de uma solução particular.

Seja c a função de custo e \mathcal{S}_p o conjunto de soluções possíveis ($s \in \mathcal{S}_p$) e estando-se a tratar, por exemplo, de um problema de minimização, partindo da solução s cujo custo é $c(s)$ e provocando uma alteração nesta configuração, originando a solução s' de custo $c(s')$, o método de Busca Local avalia a diferença de custos $\Delta(c) = c(s) - c(s')$ e determina a aceitação ou não da nova solução s' . Se $\Delta(c)$ for positivo a solução é aceite, caso contrário a solução é rejeitada e o processo volta ao início. Esta técnica assume assim uma estratégia descendente ilustrada na Figura 5.1 sendo a solução final totalmente dependente da solução inicial.

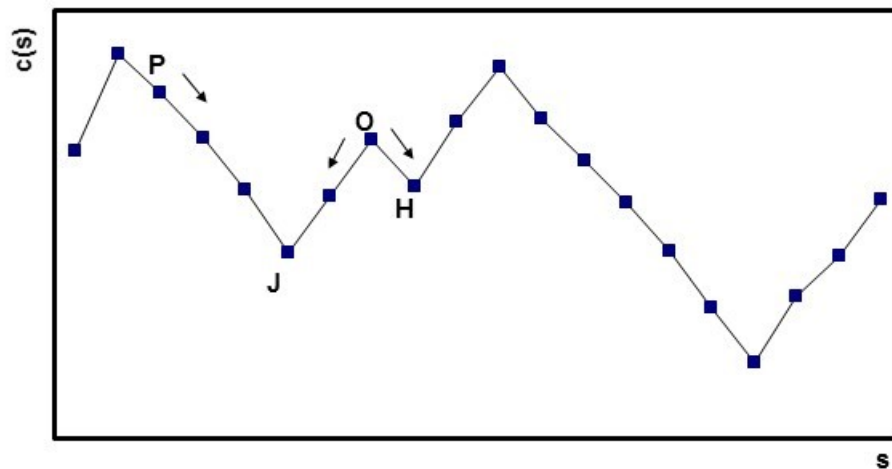


Figura 5.1 – Representação de uma estratégia descendente (adaptado de Reeves (1993)).

O método tende a encontrar sempre a solução que representa o mínimo adjacente à solução inicial. Por exemplo a solução inicial P , da figura anterior, levaria à solução final J . Por outro lado, o máximo local O , escolhido como solução inicial, poderia originar dois valores como solução final, J e H , também eles ótimos locais e adjacentes a O .

É fácil perceber, através deste exemplo simples, qual o principal inconveniente deste método.

O algoritmo cai facilmente num ótimo local, bastando para tal que na vizinhança da solução que se está a analisar não exista nenhuma solução que a melhore.

Assim, é fundamental, ao utilizar o método de Busca Local, traçar a melhor estratégia para fazer os rearranjos do sistema para geração de novas soluções e começar o processo com diferentes soluções iniciais. Esta forma de agir reduz a dependência do algoritmo em relação à solução inicial mas coloca o problema de quando parar o algoritmo. Usando todas as soluções como ponto de partida para as buscas locais, o algoritmo convergiria assintoticamente para a solução ótima, o que não é viável em problemas de grandes dimensões.

O Recozimento Simulado apresenta maior flexibilidade que o processo apresentado anteriormente não rejeitando à partida todas as soluções que “deterioram” o estado do sistema. A aceitação destas soluções é feita segundo uma probabilidade definida pelo chamado critério de Metropolis. Este critério traduz-se em aceitar todas as soluções melhores que a solução anterior e também as que a piorem, com uma probabilidade que é tanto menor quanto maior for a diferença de custo entre a solução que está a ser avaliada e a anterior. Assim, em relação ao método de Busca Local, o Recozimento Simulado tem a grande vantagem de, através da utilização do critério de Metropolis adquirir um certo “sentido de orientação” e autonomia permitindo ao algoritmo, não cair, tão facilmente, em ótimos locais.

A designação de Recozimento Simulado é consequência da origem do método. Descreve-se a seguir a sua origem e a analogia entre este e a Termodinâmica, cujo conhecimento se entende fundamental para a compreensão do mesmo.

A utilização do método do Recozimento Simulado como técnica de otimização em problemas de natureza discreta data do início dos anos 80. No entanto, foi na década de 50, mais propriamente em 1953, com Metropolis *et al.*, que surgiu a ideia básica deste método.

Foi inicialmente aplicado, por estes autores, a um problema de Termodinâmica que simulava a mudança de energia de um corpo metálico quando sujeito a um processo de arrefecimento até atingir o estado de energia mínima possível (equilíbrio termodinâmico).

Ou seja, a temperatura do sistema é incrementada até um valor máximo, para o metal fundir. Nesta fase, as partículas arranjam-se aleatoriamente. Em seguida, arrefece-se o corpo metálico cuidadosamente permitindo rearranjos sucessivos das respetivas partículas, até se atingir o estado de temperatura e energia mínimas possíveis. A esta temperatura as partículas do corpo

metálico formam um arranjo altamente estruturado conhecido como cristal. No entanto, verifica-se que o estado cristalino só é atingido se a temperatura inicial for suficientemente elevada e o seu arrefecimento for suficientemente lento. Caso contrário, obter-se-á um corpo que, apesar de já estar à temperatura mínima, ainda não atingiu o estado de energia mínima possível. No entanto, se o arrefecimento for suficientemente lento e o número de rearranjos, em cada temperatura, for suficientemente elevado o corpo encontra o equilíbrio termodinâmico ou seja adquire um estado estacionário em cada patamar de temperatura. Nestas condições, ao longo do processo de arrefecimento, a probabilidade de ocorrência dos diferentes rearranjos do sistema tendem para uma distribuição de Boltzmann e para um estado de energia mínima. Por outro lado, a uma dada temperatura θ , cada incremento de energia δE , dá-se, segundo as leis da Termodinâmica, com uma probabilidade que é igual a:

$$p(\delta E) = \exp\left(\frac{-\delta E}{k_B \theta}\right) \quad (5.6)$$

onde k_B representa a constante física de Boltzmann (Metropolis *et al.*, 1953).

Metropolis *et al.* criaram um algoritmo que traduz o comportamento anterior e que simula a evolução do arrefecimento do corpo metálico até atingir o equilíbrio termodinâmico.

Aquele algoritmo parte de um estado corrente i com energia E_i , sendo o estado seguinte j gerado aplicando uma pequena perturbação em i , conseguindo-se um estado com nova energia E_j . Se a diferença de energia $E_j - E_i$ é menor ou igual a zero o estado j é aceite e passa a ser o estado corrente. Se a diferença de energia é maior que zero, o estado j é aceite com uma certa

probabilidade que é dada por: $\exp\left(\frac{E_i - E_j}{k_B \theta}\right)$ onde θ é a temperatura a que se encontra o

corpo.

Este processo é repetido para um número predefinido de iterações, em cada temperatura, até o sistema atingir um estado estável de arrefecimento.

Ao critério de aceitação, descrito anteriormente, chamou-se critério de Metropolis, sendo o algoritmo que o utiliza Algoritmo de Metropolis.

Trinta anos mais tarde, começam a surgir novos desenvolvimentos deste processo, agora já aplicados à resolução de problemas de otimização. Os pioneiros desta nova aplicação foram Kirkpatrick *et al.* (1983) e Cerny (1985) independentemente. Estes autores aplicaram os princípios do algoritmo de Metropolis ao bem conhecido problema do caixeiro viajante, obtendo resultados muito satisfatórios.

Desde então muito se tem escrito sobre o Recozimento Simulado e a muitos domínios se tem aplicado como técnica de otimização.

Houve, evidentemente, que assumir uma analogia entre a terminologia e os conceitos envolvidos no problema de termodinâmica e os problemas de otimização.

A seguir descreve-se a ideia básica do método do Recozimento Simulado fazendo-se a analogia entre este e o problema inicial de Termodinâmica.

Em primeiro lugar e como em qualquer método de otimização, terá de se posicionar o problema e descrever o modelo que se pretende resolver. Também importante é definir a função de custo que será uma medida quantitativa do objetivo que se pretende atingir e terá de respeitar as restrições do problema. Esta função de custo corresponde, no problema de Termodinâmica, à quantificação de energia do corpo metálico.

O algoritmo do Recozimento Simulado, para um valor inicial de um parâmetro de controle (que corresponde à temperatura inicial do sistema de partículas no problema de Termodinâmica), inicializa-se com a escolha de uma solução inicial para o problema, calculando o custo que lhe está associado.

Este custo corresponde no problema de Termodinâmica à energia do arranjo inicial do corpo ainda quando ele é bastante desorganizado e, portanto, com uma energia distante da energia mínima. Como tal, também a solução inicial no problema de otimização estará, à partida, bastante longe do ótimo pretendido.

Após isto, o algoritmo toma a solução inicial e provoca-lhe uma perturbação, tal como na Termodinâmica as partículas se reorganizam e formam um novo rearranjo do sistema. Ou seja, o algoritmo cria o que se designa por solução candidata. Esta solução candidata vai ser comparada com a solução anterior, a chamada solução corrente, sendo aqui introduzido, no algoritmo, o critério de Metropolis.

Assim, utilizando a mesma terminologia que há pouco, sendo c a função de custo e \mathcal{S}_p o conjunto de soluções candidatas ($s \in \mathcal{S}_p$) e estando-se a tratar, por exemplo, de um problema de minimização, gerada aleatoriamente uma solução candidata, s' , de custo $c(s')$, a partir da solução s , a transição de s para s' vai ser realizada com probabilidade $p = \min\{1, \exp(\Delta c/\theta)\}$, em que $\Delta c = c(s) - c(s')$, sendo θ o valor do parâmetro de controle (o equivalente à temperatura no problema de Termodinâmica, como já foi referido).

Dito de outra forma, para um dado valor do parâmetro de controle, o valor de $\exp(\Delta c/\theta)$ é comparado com um número aleatório entre 0 e 1. Se este número é menor que a exponencial, então a nova solução é aceite, caso contrário é rejeitada. Este processo será repetido para aquele valor do parâmetro de controle um determinado número de vezes até não se conseguir

melhorar mais a solução (estado estacionário no problema de Termodinâmica), após o que se procederá à diminuição daquele parâmetro.

No algoritmo inicial de Kirkpatrick *et al.* esta diminuição é feita de tal forma que a probabilidade de ocorrência das soluções converge para uma distribuição de Boltzmann, tal como no problema anterior.

Esta propriedade de convergência para uma solução globalmente ótima deriva do facto de não serem automaticamente excluídas as transições de soluções de baixo custo para soluções de custo mais elevado; uma solução com custo superior é ou não aceite dependendo da variação de custo em relação ao custo da solução anterior e do valor do parâmetro de controlo. Pelo critério de Metropolis verifica-se que, inicialmente, mesmo transições muito negativas serão aceites; à medida que o parâmetro de controlo vai diminuindo, as soluções de pior qualidade são menos prováveis de serem aceites.

Para se encontrar a solução globalmente ótima é necessário ainda que o parâmetro de controlo seja diminuído de forma apropriada e que, para cada valor daquele parâmetro, o número de iterações (cada avaliação de uma solução candidata pelo critério de Metropolis é designada, neste contexto, por iteração) seja suficiente para que se encontre um ótimo obtendo-se o estado estacionário para aquele valor do parâmetro de controlo, como foi referido anteriormente.

Desta forma, o sistema convergirá para a configuração de custo globalmente mínimo, tal como no problema de Termodinâmica o sistema convergia para o estado de energia mínima possível dando origem a um cristal.

A Tabela 5.1 apresenta um resumo da analogia entre o problema de termodinâmica e o problema de otimização, referindo a equivalência de nomenclatura dos principais termos envolvidos num e noutro problema.

Tabela 5.1 – Analogia entre o Problema de Termodinâmica e o Problema de Otimização

Problema Termodinâmico	Problema de Otimização
Estados do sistema	Soluções possíveis
Energia	Custo
Perturbação do sistema de partículas	Geração de uma solução candidata
Temperatura	Parâmetro de controlo
Estado de mínima energia	Solução ótima

É de referir que o termo “temperatura” continua a ser utilizado para designar o parâmetro de controlo como consequência da origem do método, não tendo, como é evidente o significado que tinha no problema inicial. Nesta tese os dois termos utilizar-se-ão indiscriminadamente. Quanto à constante de Boltzmann ela é absorvida pelo parâmetro de controlo no algoritmo do Recozimento Simulado (Fragoso, 2003).

5.2.2 Algoritmo do Recozimento Simulado

Esquemáticamente, o algoritmo do Recozimento Simulado pode ser escrito da forma representada na Figura 5.2 (Dougherty and Marrayott, 1991).

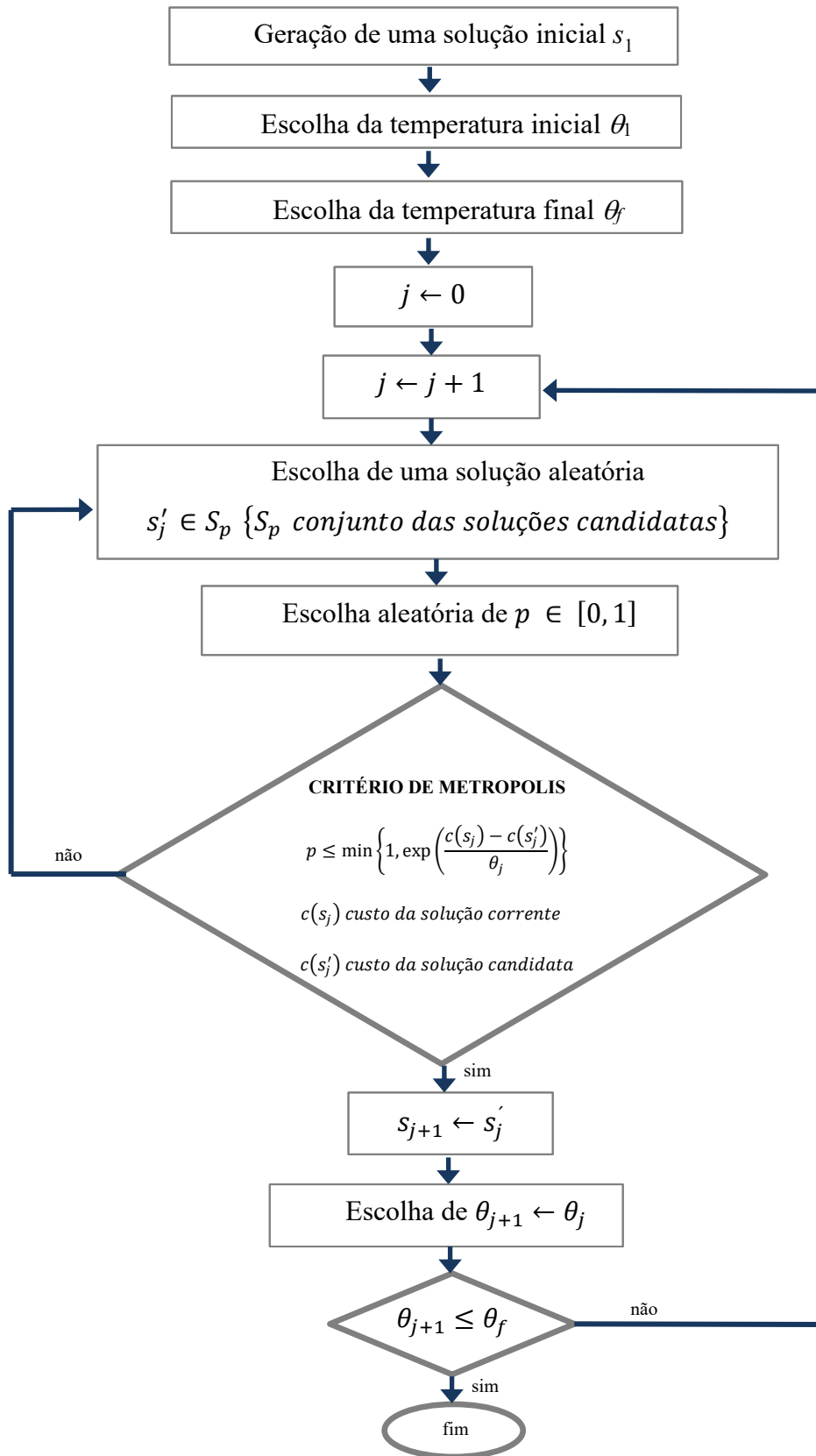


Figura 5.2 - Algoritmo do Recozimento Simulado para um problema com um objetivo.

Conhecido, ainda que de uma forma genérica, o algoritmo do Recozimento Simulado, entende-se, agora de uma forma mais clara, a vantagem deste método relativamente ao método de Busca Local. Como já foi referido, no Recozimento Simulado, cada solução terá de passar no critério de Metropolis. Inicialmente, a temperaturas elevadas, mesmo soluções muito “fracas” serão aceites. À medida que a temperatura vai baixando também a probabilidade de aceitação dessas soluções baixa, aproximando-se de zero quando o processo de otimização se aproxima do fim. Assim, a aceitação ou não de uma solução depende da diferença de custo relativamente à anterior bem como da temperatura a que o sistema se encontra.

Esta dependência, não só da diferença de custo como também da temperatura, não rejeitando à partida as soluções piores, permite ao algoritmo “escapar” dos ótimos locais e explorar mais completamente o domínio das soluções possíveis (Fragoso, 2003).

5.2.3 Convergência e Tempo de Resolução

É possível demonstrar, em termos teóricos, o algoritmo do Recozimento Simulado converge em probabilidade para uma solução ótima global.

A diminuição da probabilidade de aceitar soluções que pioram o valor da função objetivo é controlada pela diminuição do parâmetro temperatura, como já se referiu e como é fácil deduzir pela observação da expressão utilizada pelo critério de Metropolis.

Matematicamente, o problema de Termodinâmica atrás enunciado é modelado através das cadeias de Markov. Uma cadeia de Markov é um conjunto de estados de um sistema, de que se conhece a probabilidade de transição entre cada dois estados. A uma dada temperatura ocorre um conjunto de soluções cujo número se designa por dimensão da cadeia de Markov.

Aarts e Van Laarhoven (1985) mostraram que se o número de iterações, em cada temperatura, for suficientemente elevado para garantir condições de equilíbrio (isto é, já não é possível melhorar a solução àquela temperatura), a solução ótima global ocorrerá com probabilidade igual a um à medida que a temperatura tende para zero.

Mitra *et al.* (1985) também fizeram estudos neste sentido e provaram que, para determinadas formas de diminuir a temperatura, o método converge para um ótimo global. Outros trabalhos também surgiram, como o de Hajek (1988), com outras formas para o arrefecimento da temperatura que também garantem a convergência.

Na prática, no entanto, a convergência do método é limitada pois os resultados traduzidos nos trabalhos anteriores requerem, para serem implementados, um número de iterações extremamente elevado e tempos de execução impraticáveis. No entanto, eles fornecem linhas orientadoras para se obter uma solução o mais próxima possível da ótima num tempo de resolução razoável.

Várias medidas podem ser tomadas para reduzir o tempo de resolução do algoritmo do Recozimento Simulado. O Recozimento Simulado pode ser usado utilizando cadeias de Markov de tamanho finito para uma sequência de valores descendentes do parâmetro temperatura cujo valor mínimo será definido por um critério de paragem. Daqui ressalta um aspeto muito importante relativo ao algoritmo do Recozimento Simulado que é o designado Processo de Arrefecimento do qual depende o tempo de resolução e a qualidade das soluções obtidas.

O Processo de Arrefecimento envolve a escolha da temperatura inicial, a escolha da função segundo a qual é feita a diminuição da temperatura, a definição do número de iterações a cada temperatura (isto é, a dimensão da cadeia de Markov) e a escolha do critério de paragem.

Relativamente ao valor da temperatura inicial pretende-se que este seja tal que permita uma aceitação inicial de soluções que cubra todo o espaço de soluções possíveis. Analisando o critério de Metropolis verifica-se que tal só é possível com um valor de temperatura inicial elevado. Kirkpatrick *et al.* sugeriram que os valores anteriores fossem definidos de forma a garantir uma percentagem de aceitação inicial (número de soluções aceites no critério de Metropolis / número de soluções candidatas) de 80%. Nestas condições, com uma temperatura inicial elevada, a aceitação de uma nova solução é muito provável e a solução final tenderá a tornar-se independente da final.

Para se fazer uma escolha correta da temperatura inicial seria conveniente estimar a diferença de custos entre as várias soluções, o que por vezes é complicado em problemas reais, onde o espaço de soluções não é de simples definição.

Relativamente à forma de arrefecer a temperatura, verifica-se que um rápido arrefecimento levará a menos tempo de cálculo, mas não dará tantas garantias em termos de otimalidade global. Um arrefecimento mais moroso trará mais garantias, mas será mais dispendioso em termos de tempo de cálculo. A situação mais favorável andarà entre estas duas.

Kirkpatrick *et al.* (1983) e Kirkpatrick (1984) sugerem que a temperatura seja multiplicada por um valor elevado para permitir um arrefecimento suave, entre 0.8 e 0.99. Pode-se também fazer variar a taxa de arrefecimento de acordo com o andamento do algoritmo, procedimento sugerido por Huang *et al.* (1986).

No que diz respeito à dimensão da cadeia de Markov, muitas vezes ela é relacionada com a dimensão do conjunto de soluções possíveis, podendo variar de temperatura para temperatura. Citam-se, aqui também as contribuições de vários autores. Kirkpatrick *et al.* (1983) sugerem que o número de iterações em cada temperatura esteja relacionado com o número de variáveis

de decisão do problema. Huang *et al.* (1986) sugerem que aquele valor seja ajustado à medida que se dá o arrefecimento, de forma a que se passe mais tempo em temperaturas mais baixas evitando a queda em ótimos locais.

Dougherty and Marryott (1991), através da experiência que adquiriram nos problemas que resolveram, recomendaram que o número de iterações em cada temperatura fosse igual ao número de variáveis de decisão multiplicado por 100.

No entanto, uma boa opção, para calcular aquele número será utilizar o “*feedback*” do algoritmo. Isto é, pode-se adotar um número mínimo de iterações antes de mudar de temperatura, podendo aquele número aumentar se o algoritmo verificar que, àquela temperatura, o valor da melhor solução ou da média das soluções continua a aumentar.

Relativamente ao critério de paragem, este deve ser tal que o algoritmo só pare quando se atingiu uma solução que, por mais que se baixe a temperatura, já não melhora. Existem várias propostas na literatura neste sentido, como por exemplo as de Lundy and Mees (1986). O critério de paragem mais simples de todos consiste em especificar à partida o número total de iterações e parar quando este for satisfeito. Este critério é algumas vezes utilizado, mas seguramente não é o que produz melhores resultados, pois pode levar à paragem precoce do algoritmo. Por exemplo, um bom critério de paragem será o de avaliar o número de patamares de temperatura consecutivos em que não houve melhoramento da solução.

Um outro aspeto que se revela de crucial importância e do qual também dependem a qualidade das soluções e o tempo de execução diz respeito prende-se com a geração do domínio de soluções candidatas, isto é com a forma como se faz o rearranjo das soluções correntes para geração dessas soluções.

No processo de geração de uma solução candidata é importante o conceito de solução vizinha. Por vizinhança de uma solução entende-se o conjunto de soluções que podem resultar da solução anterior por pequenas alterações realizadas nesta. Isto é, uma solução s' diz-se fazer parte da vizinhança da solução s se e só se resultou de uma modificação desta de tal forma que continue a fazer parte do conjunto de soluções possíveis. O conjunto de soluções vizinhas está contido no conjunto de soluções candidatas.

A vizinhança é assim dependente da forma adotada para gerar soluções candidatas. Para tal não existem regras definidas e rígidas que servem para todos os problemas. Existem, no entanto, regras provenientes da investigação e apontadas na literatura como linhas orientadoras quando se utiliza o algoritmo do Recozimento Simulado, às quais se fará referência seguidamente (Reeves, 1993).

Em cada iteração (entenda-se por iteração a avaliação de uma solução candidata no teste de Metropolis, podendo ser aceite ou não) estão, assim, envolvidos dois processos distintos: a geração da solução candidata e o cálculo do custo que lhe está associado. Ambos os processos deverão ser rápidos e eficientes.

Relativamente ao primeiro processo, a forma como se geram soluções candidatas deve ser tal que toda a solução deve poder ser gerada a partir da anterior (mesmo que tal requeira um grande número de iterações). Isto é, a partir de uma solução, deve ser possível atingir qualquer outra. Por outro lado, uma vizinhança proveniente de alterações pequenas e simples leva geralmente a melhores resultados que vizinhanças resultantes de grandes e complexas alterações.

No que diz respeito ao segundo processo, por vezes é possível não recalculer o custo, associado à nova solução na íntegra, bastando analisar e recalculer a parcela do custo que muda nas novas soluções.

A primeira solução com a qual o algoritmo vai trabalhar designa-se por solução inicial.

Assim, o algoritmo começa por ter de encontrar uma solução inicial que respeite as restrições do problema. Esta escolha da solução inicial é aleatória ainda que possa obedecer a determinadas regras garantindo que a solução final é independente da solução inicial.

Em suma, o rearranjo de uma solução corrente deve ser traduzido tanto quanto possível por pequenas perturbações e o tempo de execução computacional deve ser gasto em quantas mais iterações melhor, de forma a dar uma melhor garantia que a solução final estará perto do ótimo global.

Como já foi dito, tanto ao nível do Processo de Arrefecimento como ao nível da escolha das soluções candidatas, não é possível estabelecer regras fixas que dêem para todos os casos resultados de boa qualidade. No entanto, é possível definir algumas linhas de ação e até mesmo construir algoritmos gerais que consideram diferentes estratégias quer a um nível quer ao outro.

Neste sentido têm vindo a surgir diferentes classificações para variantes ao algoritmo do Recozimento Simulado. A título de exemplo apresenta-se uma classificação proposta por Cohen (1994) e Ingberg (1996). Estes autores classificam o Recozimento Simulado em Boltzmann Annealing (BA), Cauchy Fast Annealing (CFA), e Adaptive Simulated Annealing (ASA), o último também designado por Very Fast Simulated Reannealing (VFSR). Estas variantes seguem a mesma ideia de base mas surgem sempre numa tentativa de acelerar a convergência do método e reduzir o tempo de resolução, apresentando diferentes opções quer ao nível da própria função de aceitação, quer ao nível do esquema de arrefecimento e tudo o que ele envolve, quer ainda ao nível da geração do espaço de soluções candidatas (Fragoso, 2003).

5.3 Algoritmo do Recozimento Simulado para um Problema Multiobjetivo

Na resolução de um problema multiobjetivo não se procura uma solução única, que otimize um só objetivo, mas sim um conjunto de soluções que satisfazendo as condições (restrições) do problema otimizem os objetivos considerados. Sabe-se, no entanto, que não é exequível otimizar vários objetivos em simultâneo, mas é possível selecionar um conjunto de soluções para o problema que têm a propriedade de serem não dominadas. Isto é, a otimização de um dos objetivos é conseguida, mas em detrimento de outro ou outros. O conjunto daquelas soluções constitui, como já foi exposto, a Fronteira de Pareto.

Assim, são fundamentais dois aspetos distintos, ainda que interrelacionados: a forma como o algoritmo lida com a função multiobjetivo e avalia as novas soluções (definição do critério de aceitação) e a sua articulação com um método de aproximação da Fronteira de Pareto.

Para ultrapassar a primeira questão, o critério de aceitação a ser definido tem de lidar com a função multiobjetivo de forma a não perder um dos fundamentos principais do algoritmo do Recozimento Simulado que tem a ver com a não rejeição à partida de soluções que deteriorem aquela mesma função.

Segundo o critério de Metropolis apresentado anteriormente no âmbito da otimização uniobjetivo, as soluções que melhoram a função de custo são aceites à partida e as que não melhoram são aceites com uma probabilidade que depende da diferença de custo e da temperatura a que se está a trabalhar. No caso da otimização com objetivos múltiplos, a comparação entre duas soluções já não é tão simples podendo acontecer três situações distintas na passagem da solução corrente para a solução candidata:

a) existe o melhoramento de todos os objetivos considerados sendo a probabilidade de aceitação desta nova solução igual a 1;

- b) uns objetivos melhoram e outros pioram tendo de ser definida uma estratégia de aceitação desta nova solução;
- c) todos os objetivos pioram ou ficam iguais (um pelo menos piora estritamente) estando-se em presença de uma solução dominada. Neste caso tem de ser calculada uma probabilidade de aceitação desta nova solução, uma vez que o Recozimento Simulado não a deve rejeitar à partida.

Para definir um critério de aceitação que contemple as três situações anteriormente descritas, várias estratégias podem ser seguidas. Neste trabalho utiliza-se o Método da Soma Ponderada. Este método considera uma função composta que não é mais do que, como o nome indica, a soma dos vários objetivos ponderados por coeficientes, aos quais se dá a designação de pesos. Ou seja, antes de se dar início ao processo de otimização são atribuídos pesos aos objetivos representados na função objetivo procedendo-se posteriormente à sua soma. Este é o método mais comumente empregue pelos utilizadores do Recozimento Simulado em problemas multiobjetivo e o de mais fácil implementação, mostrando resultados satisfatórios (Ulungu *et al.*, 1999, Antunes *et. al.*, 2012, Zeferino, 2011).

Para um problema com n objetivos tem-se:

$$\min F'(X) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(X) \quad (5.7)$$

em que:

$F'(X)$ é a transformada da função multiobjetivo $F(X)$

w_i são os pesos, sendo $\sum_{i=1}^n w_i = 1$

$f_i(X)$ valores dos objetivos.

Pela existência de parcelas com diferentes unidades e ordens de grandeza distintas na função objetivo, e pretendendo-se que estes fatores não influenciem a solução final, procede-se à sua normalização.

$$f'(X) = \frac{f(X)}{\text{máx } f(X)} \quad (5.8)$$

em que:

$f(X)$ é o componente a normalizar

$\text{máx } f(X)$ é o valor máximo que se pode atribuir a $f(X)$

$f'(X)$ é o valor normalizado.

Ficando-se, finalmente, com a seguinte expressão, para a função objetivo:

$$\min F'(X) = \sum_{i=1}^n w_i f'_i(X) \quad (5.9)$$

Desta forma o processo de otimização torna-se independente das dimensões e ordens de grandeza dos parâmetros envolvidos e os pesos refletem a importância de cada componente naquele processo.

O critério de aceitação passa a ser definido da seguinte forma:

$$\begin{cases} p = 1 \text{ se } \Delta F' \leq 0 \\ p = \exp\left(-\frac{\Delta F'}{\theta_j}\right) \text{ se } \Delta F' > 0 \end{cases} \quad (5.10)$$

onde:

p probabilidade de aceitação

X_j a solução corrente

X'_j a solução candidata

$$F'(X_j) = \sum_{i=1}^n w_i f'_i(X_j)$$

$$F'(X'_j) = \sum_{i=1}^n w_i f'_i(X'_j)$$

se tem,

$$\Delta F' = F'(X'_j) - F'(X_j).$$

As várias combinações de pesos permitem localizar a busca por parte do algoritmo em diferentes regiões do conjunto de soluções possíveis. Para cada combinação de pesos, o Recozimento Simulado pela aplicação do critério de aceitação anteriormente definido e todo o processo que lhe está inerente (escolha da solução inicial, da temperatura inicial, taxa de arrefecimento, número mínimo de iterações em cada patamar de temperatura, critério de paragem) encontra naquela região a solução cujo valor da função composta é máximo (custo mínimo). No final desta etapa são gerados novos pesos definindo-se assim uma nova direção de busca. Uma escolha criteriosa das várias combinações de pesos permite “passar” no espaço de soluções possíveis para o problema conseguindo-se uma boa aproximação à Fronteira de Pareto (Jaszkiewicz, 2001).

Apresenta-se seguidamente a interpretação gráfica do Método da Soma Ponderada para uma compreensão mais clara do mesmo (Figura 5.3).

Considere-se o problema de minimização da função $F(X)$ com dois objetivos e com o conjunto de soluções possíveis Ω . $F'(X)$ é a função composta de $F(X)$.

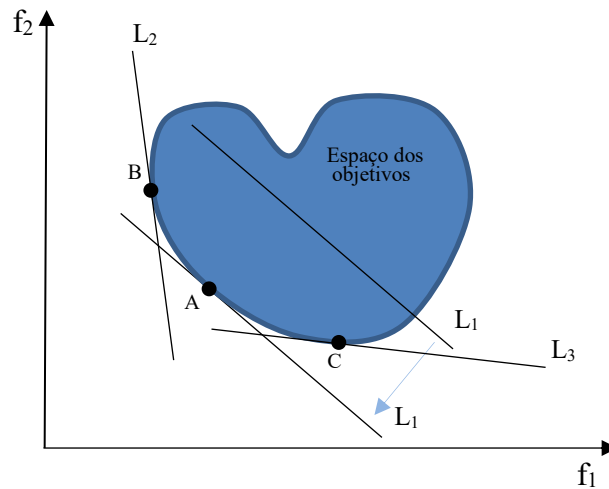


Figura 5.3 - Interpretação geométrica do Método da Soma Ponderada (exemplo de minimização de uma função com dois objetivos).

As retas L_1 , L_2 e L_3 traçadas na figura podem ser representadas pelas seguintes expressões, respectivamente:

$$w_1 f_1'(X) + w_2 f_2'(X) = c_1 \quad (5.11)$$

$$w_3 f_1'(X) + w_4 f_2'(X) = c_2$$

$$w_5 f_1'(X) + w_6 f_2'(X) = c_3$$

A minimização de $F(X)$ é interpretada como o movimento da reta L_1 , com inclinação $-w_1/w_2$, mantendo a interseção dos conjuntos L_1 e Ω . O ponto A , ponto de tangência de L_1 em relação a Ω , é uma solução ótima para a minimização de $F(X)$.

Os pontos B e C são obtidos de igual forma, agora pelos movimentos das retas L_2 e L_3 , respectivamente.

No final do processo que envolve a definição das várias combinações de pesos e a aplicação do algoritmo do Recozimento Simulado espera-se que A , B e C façam parte do conjunto que constitui a Fronteira de Pareto ou pelo menos de uma boa aproximação desta.

O movimento de cada reta depende não só da passagem das soluções no critério de aceitação como também do método de aproximação da Fronteira de Pareto implementado.

Uma solução depois de passar no critério de aceitação tem de ser analisada no que diz respeito à sua Dominância (definição 1 apresentada no Subcapítulo 5.1), para se avaliar se integra o conjunto dos ótimos de Pareto e consequentemente faz parte da Fronteira de Pareto.

Para uma melhor visualização deste método de aproximação a esta fronteira apresenta-se a Figura 5.4 que, mais uma vez, diz respeito à minimização de uma função com dois objetivos. A numeração das soluções aí representadas tem a ver com a ordem com que elas surgem no processo de aproximação à fronteira.

Após a passagem e aceitação de uma solução candidata, avaliam-se os componentes da função objetivo. Se pelo menos um dos componentes melhorar (num problema de minimização melhorar é sinónimo de *ser menor que*) em relação a todas as soluções já existentes em P (conjunto dos Ótimos de Pareto obtidos anteriormente), mesmo que seja em detrimento de outro, então a solução candidata não é dominada por qualquer solução presente em P sendo então incluída neste conjunto P (2.^a solução da Figura 5.4). Se nenhum dos componentes melhorar em relação a pelo menos uma solução já existente em P , então a nova solução é dominada (solução dominada), e por isso não é incluída no conjunto P (5.^a solução da Figura 5.4).

Quando uma solução candidata é incluída em P (solução não dominada), são excluídas do conjunto Ótimos de Pareto todas as soluções em P que são dominadas por aquela (3.^a e 4.^a soluções da Figura 5.4).

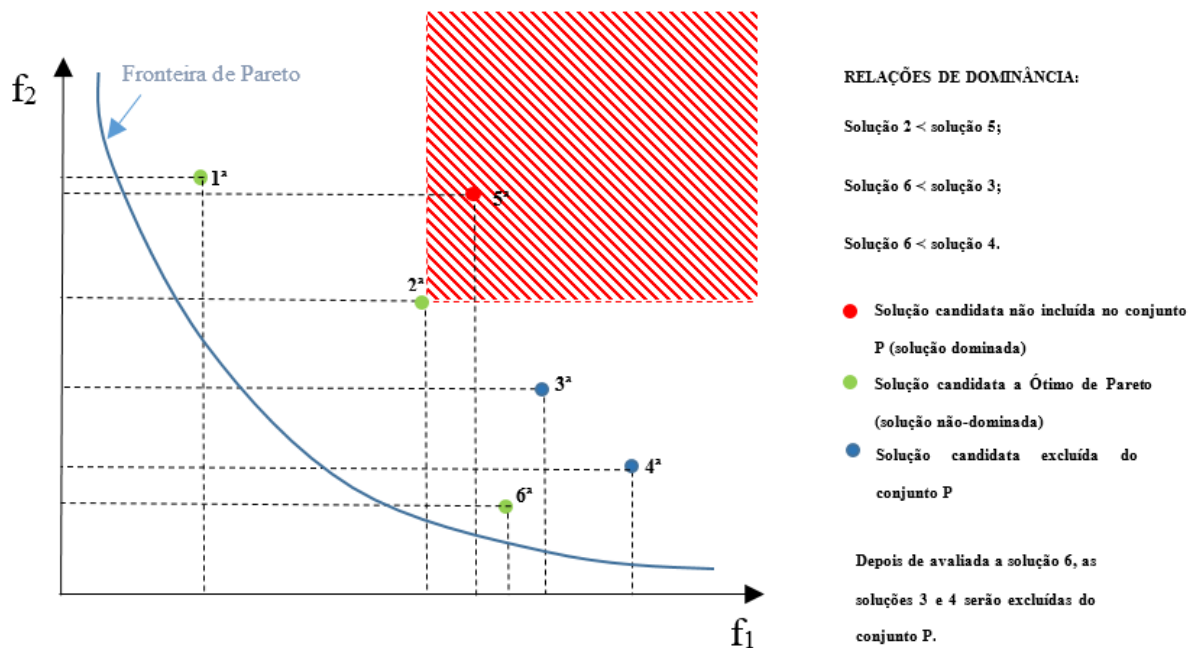


Figura 5.4 - Método de aproximação da Fronteira de Pareto – conceito de Dominância (exemplo de minimização de uma função com dois objetivos).

A Figura 5.5 apresenta o algoritmo do Recozimento Simulado quando aplicado à resolução de um problema multiobjetivo, de acordo com a exposição feita anteriormente.

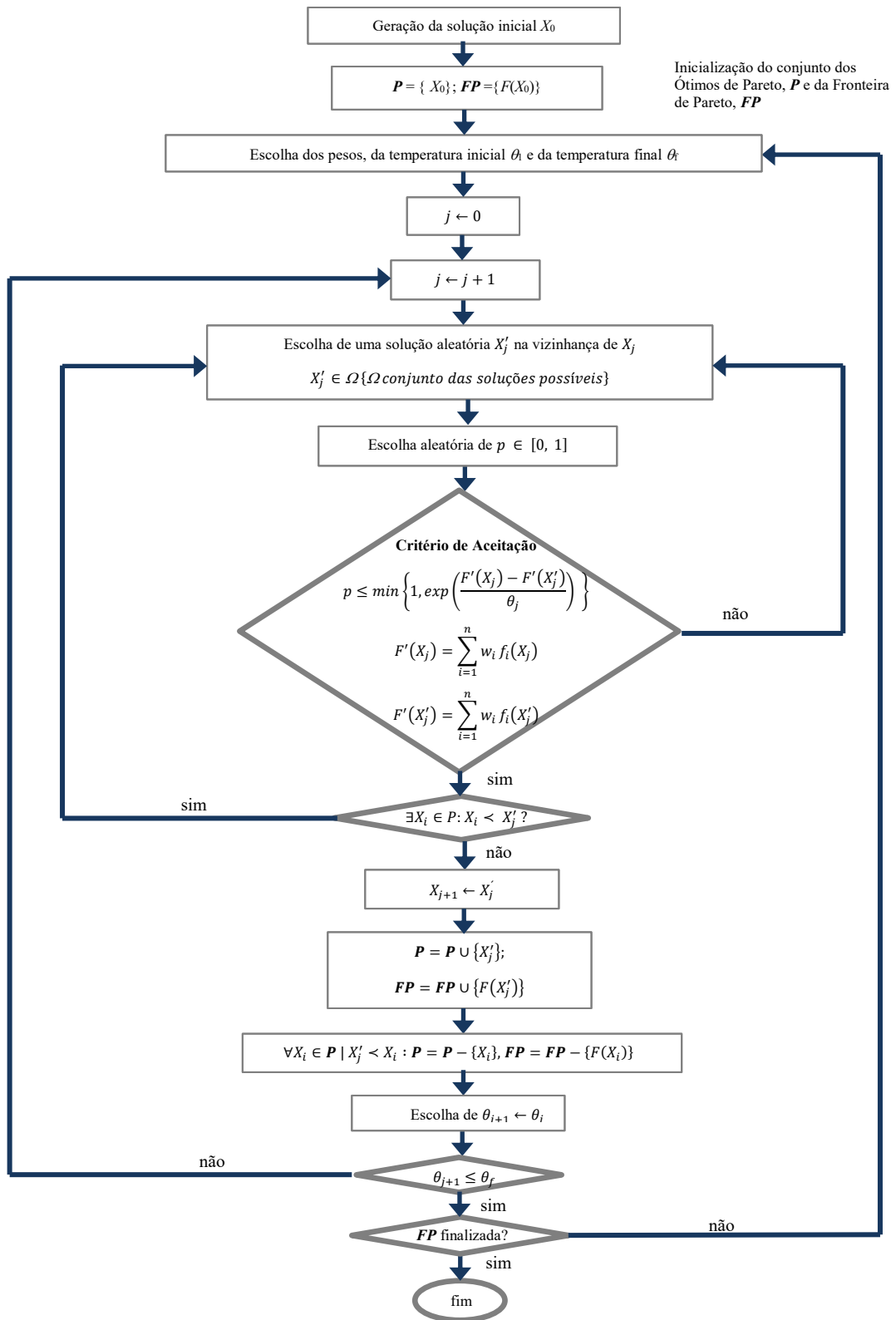


Figura 5.5 - Algoritmo do Recozimento Simulado para um problema com objetivos múltiplos.

Em rigor, no esquema anterior as designações P e FP são aproximações dos conjuntos Ótimos de Pareto e Fronteira de Pareto, respetivamente. Na verdade, aqueles conjuntos só se poderão calcular de forma precisa através de métodos exatos, o que, devido à sua complexidade, não é possível para o problema que se está a tratar. Neste sentido, naquela figura, P e FP vão representando ao longo do processo os potenciais Ótimos de Pareto e respetiva Fronteira de Pareto, pretendendo-se que no final representem a melhor aproximação aos conjuntos reais.

Para garantir a melhor aproximação àqueles conjuntos torna-se necessário assegurar duas propriedades que são comuns na aplicação de qualquer heurística a um problema multiobjetivo, a convergência e a diversidade. No caso do Recozimento Simulado a convergência é de alguma forma garantida pela correta calibração dos parâmetros envolvidos no algoritmo (assunto tratado mais adiante) e pela aplicação do critério de aceitação que continua à semelhança do que se passava nos problemas uniobjetivo a não rejeitar à partida soluções “fracas”. Este aspeto acaba por contribuir também para o cumprimento da outra propriedade, a diversidade de soluções. Para garantir esta diversidade é igualmente necessário fazer uma escolha criteriosa (realizada muitas vezes por tentativa e erro) dos pesos que afetam a função objetivo de tal forma que o algoritmo possa “passear” sobre o espaço de soluções possíveis, como já foi referido. No entanto, é preciso referir que sendo a Fronteira de Pareto constituída por uma infinidade de pontos, os agentes decisores podem conseguir definir à partida quais os pesos a aplicar e por isso concentrar a busca numa região específica.

Depois de se dar por finalizada a construção da Fronteira de Pareto é necessário então avaliar a sua aproximação à Fronteira de Pareto real. Quando a Fronteira de Pareto pode ser obtida por um método exato torna-se fácil perceber a qualidade da Fronteira obtida pelo método de

resolução aplicado. Quando não é possível obtê-la, esta avaliação é mais difícil. Para ambos os casos existem várias métricas que permitem quantificar tanto a convergência como a diversidade do conjunto de soluções obtido (Ulungu *et al.*, 1999).

6 APLICAÇÃO DO MODELO DE APOIO À DECISÃO

6.1 Introdução

Depois de formulado o modelo de apoio à decisão e escolhido o método de resolução, neste caso o método do Recozimento Simulado, constrói-se um algoritmo que será traduzido num programa computacional permitindo a resolução daquele modelo.

O modelo de apoio à decisão é aplicado a um conjunto de cidades hipotéticas, construídas com uma componente aleatória relevante, sendo facilmente manobrados, calibrados e estudados, não só as dimensões e propriedades da cidade, como também todos os parâmetros envolvidos no processo, desde os dados do problema, aos relativos ao método de resolução.

No Subcapítulo 6.2 é apresentada a construção do espaço físico que integra um aglomerado urbano onde os aspetos fundamentais e característicos de uma cidade são considerados, tentando-se construir um espaço o mais próximo possível da realidade.

Por outro lado, no Capítulo 5, foi apresentado o método do Recozimento Simulado de uma forma genérica, sendo necessário agora fazer uma descrição do mesmo aplicado à resolução do problema em análise. Neste âmbito, nas Subsecções 6.3.1 e 6.3.2 são abordados dois aspetos. Um prende-se com a geração de soluções candidatas, aspeto este intimamente ligado às características do problema. E o outro, relacionado com as especificações relativas ao algoritmo do método de resolução, prende-se com a descrição do Processo de Arrefecimento adotado e respetiva calibração. Com a calibração do algoritmo, apresentada na Secção 6.3.3, encontram-se os valores dos parâmetros envolvidos no Processo de Arrefecimento, com os quais se chega ao conjunto representativo das melhores soluções, quer em termos do valor da função objetivo, quer em termos de tempo de resolução.

Na Secção 6.3.4 é verificada a robustez do algoritmo. Só desta forma é possível ter confiança nos resultados obtidos, após o que, na Secção 6.3.5 é apresentado um conjunto de cenários para analisar o esforço computacional em função do crescimento populacional, dimensão da cidade e combinação dos pesos afetos à função objetivo. Para cada uma das análises referidas é escolhido o subconjunto de cenários mais apropriado.

No Subcapítulo 6.4, algumas das melhores soluções encontradas com os cenários apresentados, são analisadas com base num conjunto de indicadores que se entendem pertinentes na ótica da análise estratégica da expansão das infraestruturas de uma cidade.

Para implementação do programa computacional e análise dos resultados foi utilizada uma máquina com as seguintes características:

- Sistema operativo: Microsoft Windows 7 Professional versão 6.1.7601 Service Pack 1;
- CPU: 2.53 GHz Intel® Core™ 2 Duo;
- Memória: 4 GB RAM, 4 MB cache;
- Disco: 500 GB.

Para executar a calibração do algoritmo e para correr os cenários utilizaram-se máquinas virtuais com as seguintes características:

- Sistema operativo: Ubuntu 14.04.3 LTS;
- CPU: 2.4GHz Intel® Core™ 2;
- Memória: 4 GB RAM, 8 MB cache;
- Disco: 40 GB.

A caracterização da cidade hipotética, os algoritmos utilizados e todas as análises efetuadas foram realizados na linguagem de programação Python 2.7.

6.2 Caracterização da Cidade Hipotética

Geração e classificação dos centróides

Como já se referiu anteriormente, para se proceder à análise pretendida, faz-se a representação esquemática da cidade através de um grafo, constituído por nós e por arcos, sendo o nó designado por centróide quando é representativo de uma área específica da cidade (por exemplo um bairro ou conjunto de bairros).

O nome atribuído aos centróides é consequência da atividade que prevalece na área que eles representam e, portanto, é importante aqui sublinhar que, no presente trabalho, as atividades principais que se consideram na construção da cidade são as residenciais, as de comércio retalhista e serviços (atividades centrais), as industriais e de comércio grossista.

Definidas a população total a considerar na cidade, a densidade populacional média e a distância mínima entre centróides, calcula-se o número de centróides pelos quais é distribuída aquela população. Como se considera que na área que aqueles centróides representam, a atividade principal é a residencial passam a designar-se por centróides residenciais.

Em seguida, define-se um rácio entre o número de centróides residenciais e o número de centróides cuja atividade preponderante é a industrial ou comercial grossista, calculando-se desta forma o número de centróides que se passam a designar por industriais ou comerciais.

Aleatoriamente são atribuídas as coordenadas (x, y) aos centróides residenciais respeitando a distância mínima entre eles. Cada centróide assim definido fica a representar o centro geométrico da sua área de influência, isto é, da área que representa (Figura 6.1).

Aquela distância mínima é também aplicada aquando da localização dos centróides industriais e comerciais, tendo-se como localização preferencial para estes, a área periférica da cidade.

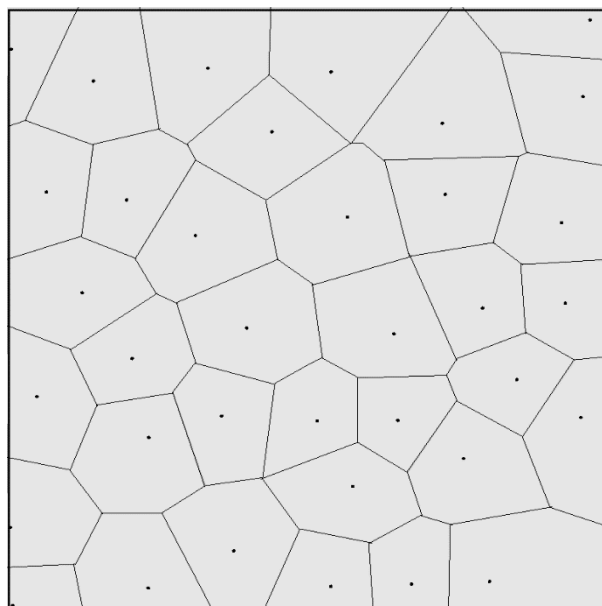


Figura 6.1 - Representação da área da cidade existente com os centróides e respectivas áreas de influência.

Para a localização dos centróides estar completa é necessário definir topograficamente a cidade (z). Para tal, são definidos à partida dois intervalos de valores. Um para as altitudes mais baixas e outro para as altitudes mais elevadas. Para toda a área são definidos valores mínimos de altitude de acordo com o primeiro intervalo. Após o que, dentro do segundo intervalo, são atribuídas as cotas a um determinado número de pontos. A partir destes, faz-se o abaixamento das respetivas elevações utilizando o co-seno da distância entre os pontos analisados, suavizando, desta forma, o andamento do terreno até ficar definida topograficamente toda a área da cidade (Figura 6.2).

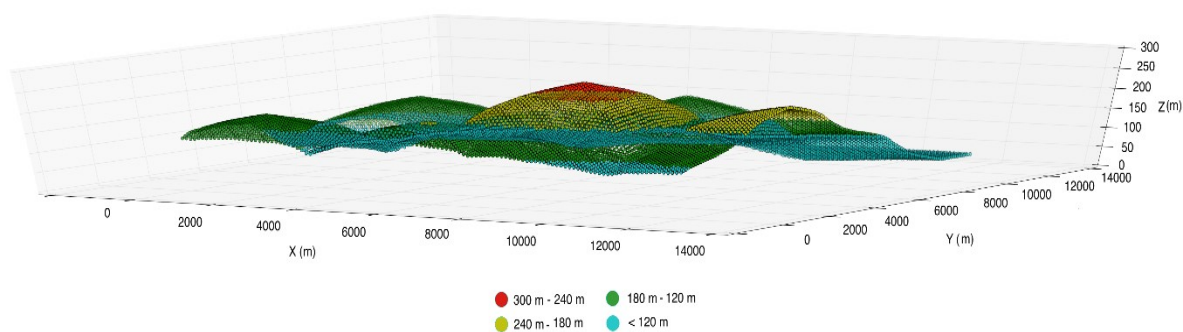


Figura 6.2 - Exemplo da topografia para a área de estudo.

Para a localização do centro da cidade, onde se localizam as atividades de comércio retalhista e de serviços, começa por se escolher o centróide mais perto do centro geométrico da área em estudo. Depois, é definida uma percentagem de centróides, os mais próximos daquele ponto, que passam a designar-se por centróides centrais.

A definição da localização e dimensão deste centro são importantes, uma vez que possui características próprias. De uma forma geral é onde se concentra grande parte do património histórico da cidade tendo perdido importância, nas últimas décadas, como área residencial. Estes aspetos são tidos em consideração no presente trabalho, sendo efetivamente reconhecidas as características peculiares dos centróides centrais, por exemplo, aquando da distribuição da população e do respetivo emprego, como será visto mais adiante.

Distribuição da população

A distribuição da população total da cidade pelos centróides é feita com base na seguinte fórmula:

$$Pop_k = \frac{\frac{a_k}{d_k}}{\sum_{k=1}^{C_{rc}} \frac{a_k}{d_k}} \times Pop_T \quad (6.1)$$

em que:

Pop_k é a população do centróide k

Pop_T é a população total

C_{rc} é o número de centróides residenciais e centrais

a_k é um coeficiente que varia conforme a tipologia do centróide

d_k é a distância do centróide k ao centro geométrico da área em estudo.

Com esta distribuição da população, espera-se que à medida que os centróides se afastam do centro sejam menos populosos. Por outro lado, é também esperado que, fazendo variar o

coeficiente a , nos centróides centrais exista uma população coerente com o que foi dito atrás para o centro da cidade (Figura 6.3).

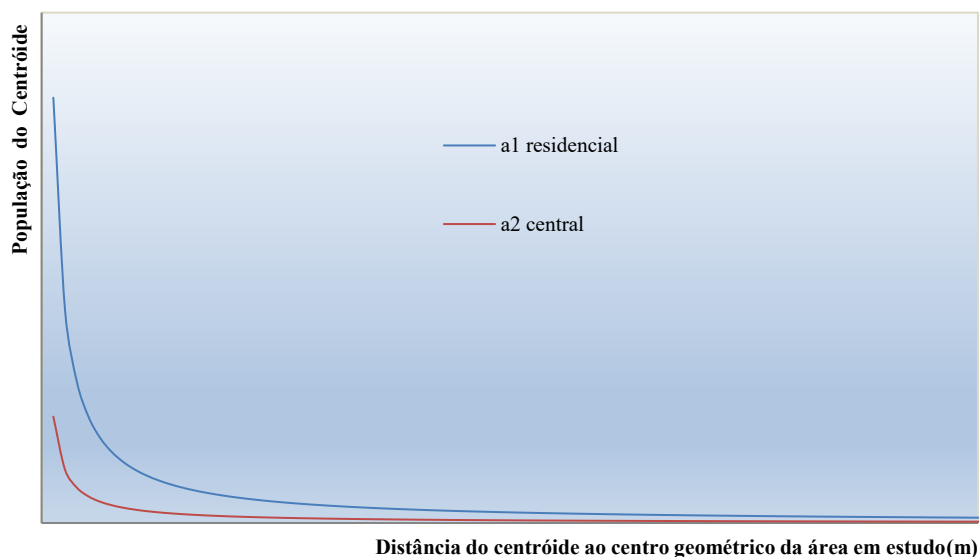


Figura 6.3 - Distribuição da população pelos centróides residenciais e centrais.

Distribuição do emprego

No âmbito da teoria da base económica distinguem-se dois tipos de atividades. Uma orientada para satisfazer a procura externa designando-se por atividade básica, outra orientada para a satisfação das necessidades da economia local, a atividade não básica.

O setor básico compreende o conjunto de atividades produtoras de bens e serviços que se destinam a satisfazer necessidades externas à área em estudo. Por sua vez, o setor não básico ou local agrega as atividades cuja função é produzir bens e serviços destinados a satisfazer a procura interna da zona, ou seja, a da população que nela reside.

Assim, uma das variáveis que pode ser utilizada para exprimir a importância de cada setor numa dada área, é o emprego.

Dentro do possível, terão de se isolar as atividades básicas das locais, o que nem sempre é fácil uma vez que, várias atividades podem, simultaneamente, satisfazer a procura local e a procura externa.

No presente trabalho, o emprego afeto ao setor básico designa-se por emprego básico, e o emprego relativo ao setor não básico designa-se por emprego não básico.

Como já foi dito, cada centróide é caracterizado pela atividade que nele prevalece, sendo a distribuição do emprego feita em concordância com essa caracterização.

Definida a percentagem de emprego total na cidade (Blank, 2014) faz-se a distribuição do emprego não básico em função da população residente em cada centróide. Segue-se a atribuição do valor de emprego básico que, para o caso em estudo, se distribui pelas atividades de indústria e comércio grossista, comércio retalhista e serviços. As duas primeiras atividades são atribuídas aos centróides industriais e comerciais, e a última é atribuída aos centróides centrais.

Domínio de expansão

O domínio de expansão da cidade considera-se contíguo à cidade existente e destituído de infraestruturas. É dividido em áreas cujo centro geométrico representa um novo centróide. Na localização destes novos centróides, representativos das áreas de expansão, faz-se respeitar a distância mínima referida anteriormente relativamente aos centróides existentes (Figura 6.4).

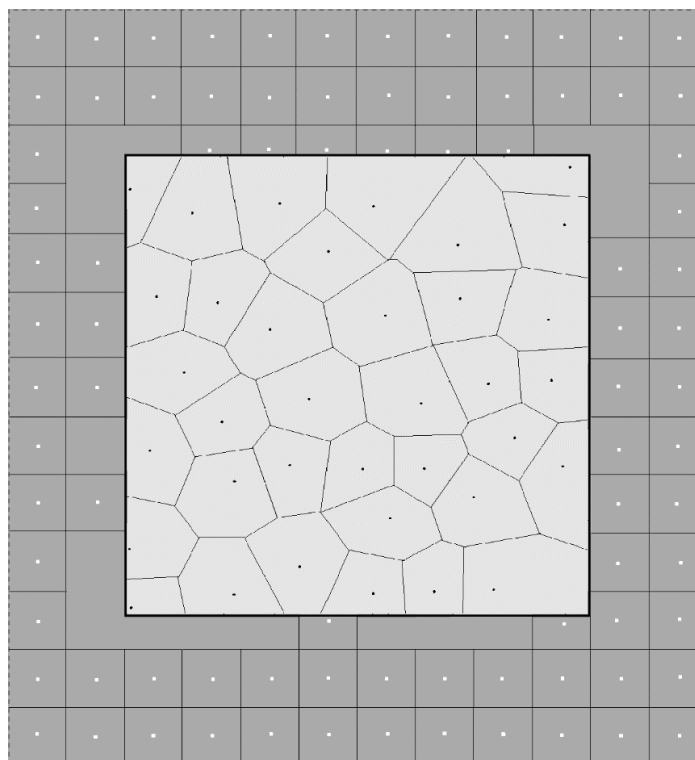


Figura 6.4 - Representação da cidade existente e respetivo domínio de expansão.

Quantificação do Índice de Aptidão do terreno à construção

O Índice de Aptidão pretende classificar as possíveis áreas de expansão para edificação, apoiando, posteriormente, a distribuição da população por aquelas mesmas áreas. No presente trabalho caracteriza-se o território fisicamente apenas em três vertentes: permeabilidade, construindo-se um mapa de permeabilidade, exposição solar produzindo-se um mapa de classificação da exposição solar e inclinação, resultando um mapa de classificação de declives para a área em estudo.

São contabilizadas estas três características porque, trabalhando com uma cidade hipotética, aquelas são, sob o ponto de vista da edificação, as mais genéricas e consensualmente utilizadas. No entanto, existe uma vasta literatura sobre a caracterização do território através de índices de aptidão (Marull *et al.*, 2007, Qiu and Zhang, 2011), e uma análise mais sofisticada ou a consideração de uma cidade real levariam naturalmente à consideração de

outros factores e características para o cálculo daquele índice, como, por exemplo, o valor ecológico e agrícola dos terrenos, a localização do património histórico, arqueológico e arquitetónico, a proteção das nascentes e cursos de água, etc.

Assim, para quantificar a adequabilidade das áreas em estudo à construção são tidas em conta as três características referidas. Uma delas é a permeabilidade do terreno. Para tal é feito um mapa de permeabilidade, construído da seguinte forma: a área em estudo é dividida num determinado número de zonas, e a cada centro geométrico da zona é atribuído um índice indicativo da respetiva permeabilidade. O índice indicativo da permeabilidade atribuída a cada centróide é a do centro geométrico mais próximo.

Por exemplo, na Figura 6.5 a área em estudo foi dividida em doze subáreas, a cada uma delas foi atribuído um índice de permeabilidade, P , correspondendo os valores mais elevados do índice a terrenos menos apropriados à construção e os valores mais baixos a terrenos mais apropriados.

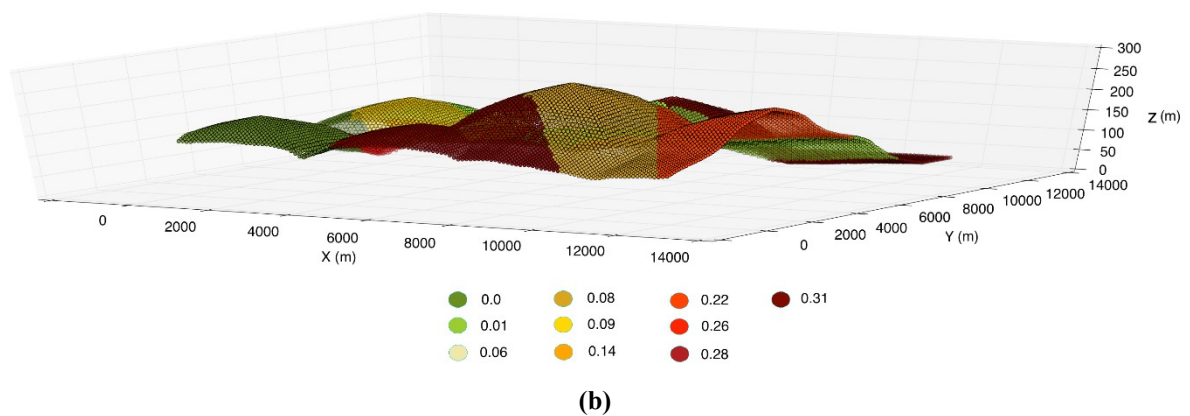
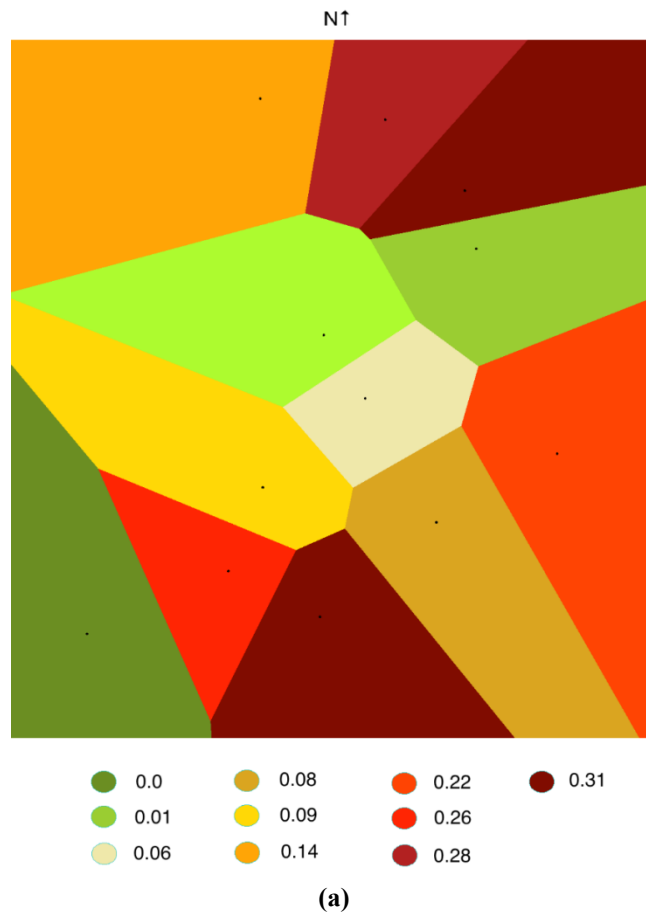


Figura 6.5 - Exemplo de geração de um mapa relativo ao índice indicador da permeabilidade do terreno, a partir da divisão da área em estudo em 12 subáreas ((a) duas dimensões, (b) três dimensões).

Outro fator tido em conta na análise da maior ou menor aptidão do terreno à construção é a exposição solar. De acordo com a Figura 6.6 e com base na topografia da cidade, é construída a Figura 6.7.

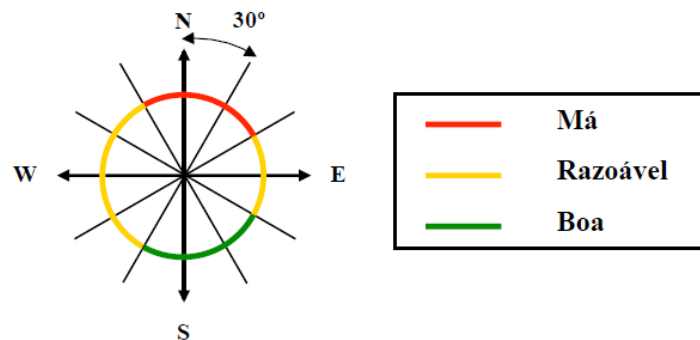


Figura 6.6 - Adequabilidade da exposição solar para edificação.

Na construção da Figura 6.7 para uma dada localização são avaliados, num determinado raio, doze pontos representativos das direções da figura acima. Através do cálculo das respetivas inclinações avalia-se a exposição solar da zona em análise. Com base nessa exposição solar atribui-se um índice designado por *ES*. Ao menor valor corresponde uma exposição solar não apropriada para edificação, correspondendo o valor máximo a uma exposição solar adequada para edificação.

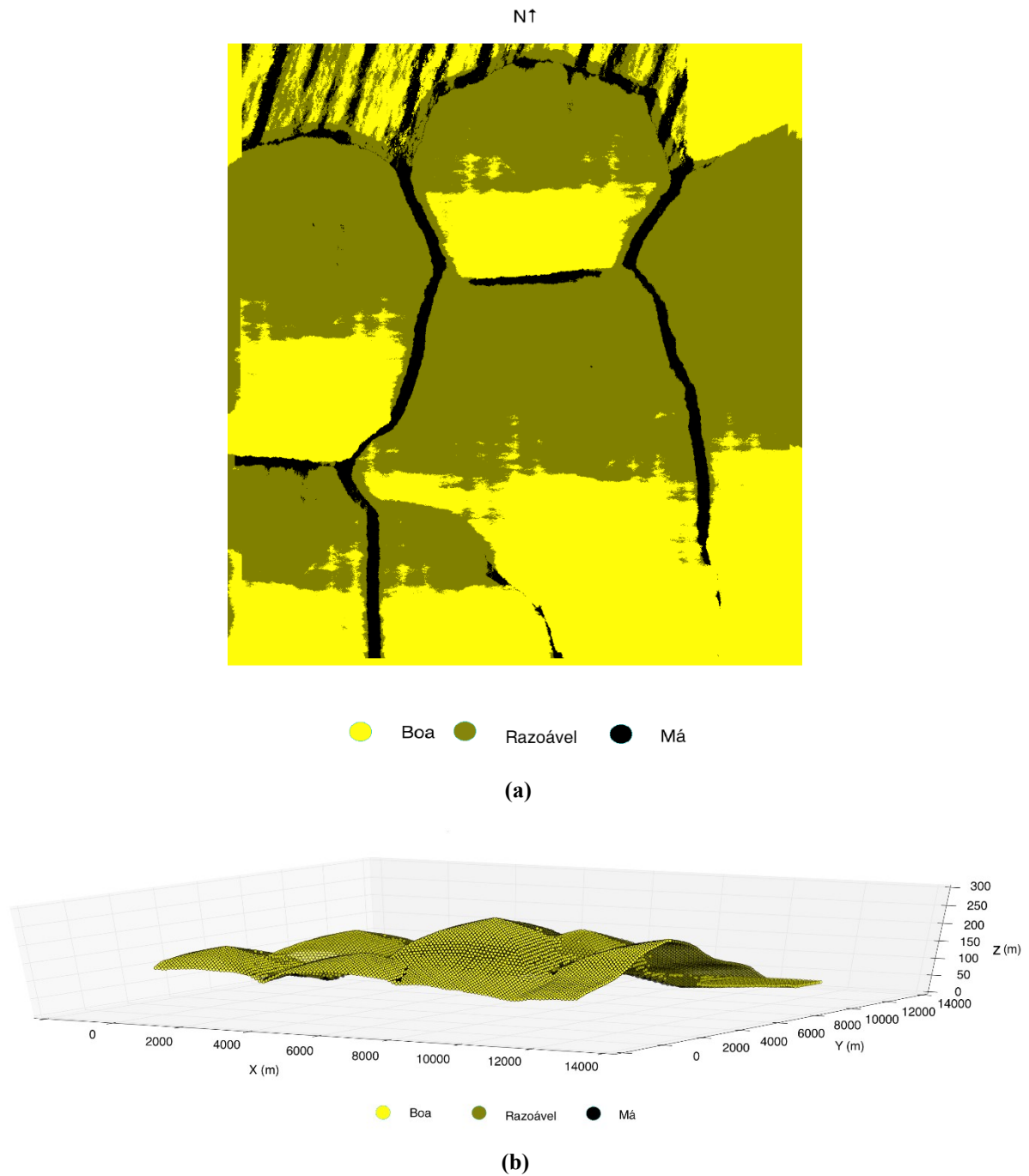


Figura 6.7 - Exemplo de um mapa de classificação da exposição solar para a área em estudo ((a) duas dimensões, (b) três dimensões).

Por fim e ainda na avaliação da adequabilidade do terreno à construção, é tida em conta a inclinação do terreno de acordo com a seguinte classificação:

Tabela 6.1 – Adequabilidade de declives para edificação.

Classes de declives (indicativas)	Classificação
0 – 2%	Fraca – para construção residencial – dificuldade de drenagem e perigo de alagamento, sobretudo se o terreno tiver fraca permeabilidade Boa – para construção industrial
2 – 5%	Ideal
5 – 8%	Boa – mas a urbanização é mais dispendiosa
8 – 12%	Aceitável – mas a urbanização é muito dispendiosa; preocupações de adaptação à topografia, sobretudo no traçado de arruamentos e outras infraestruturas
12 – 16%	Fraca – dificuldade de operação das máquinas
16 – 25%	Má
> 25 – 30%	Não se constrói – eventualmente em solos rochosos será possível a construção
> 30%	Proibido construir (em Portugal)

Com base na topografia e com os dados constantes na Tabela 6.1 é então construído um mapa de classificação de declives para a área em estudo. Na proximidade de um dado ponto são avaliados, num determinado raio, a inclinação relativa a oito pontos. A inclinação considerada para essa zona em estudo é a média dos oito valores (Figura 6.8).

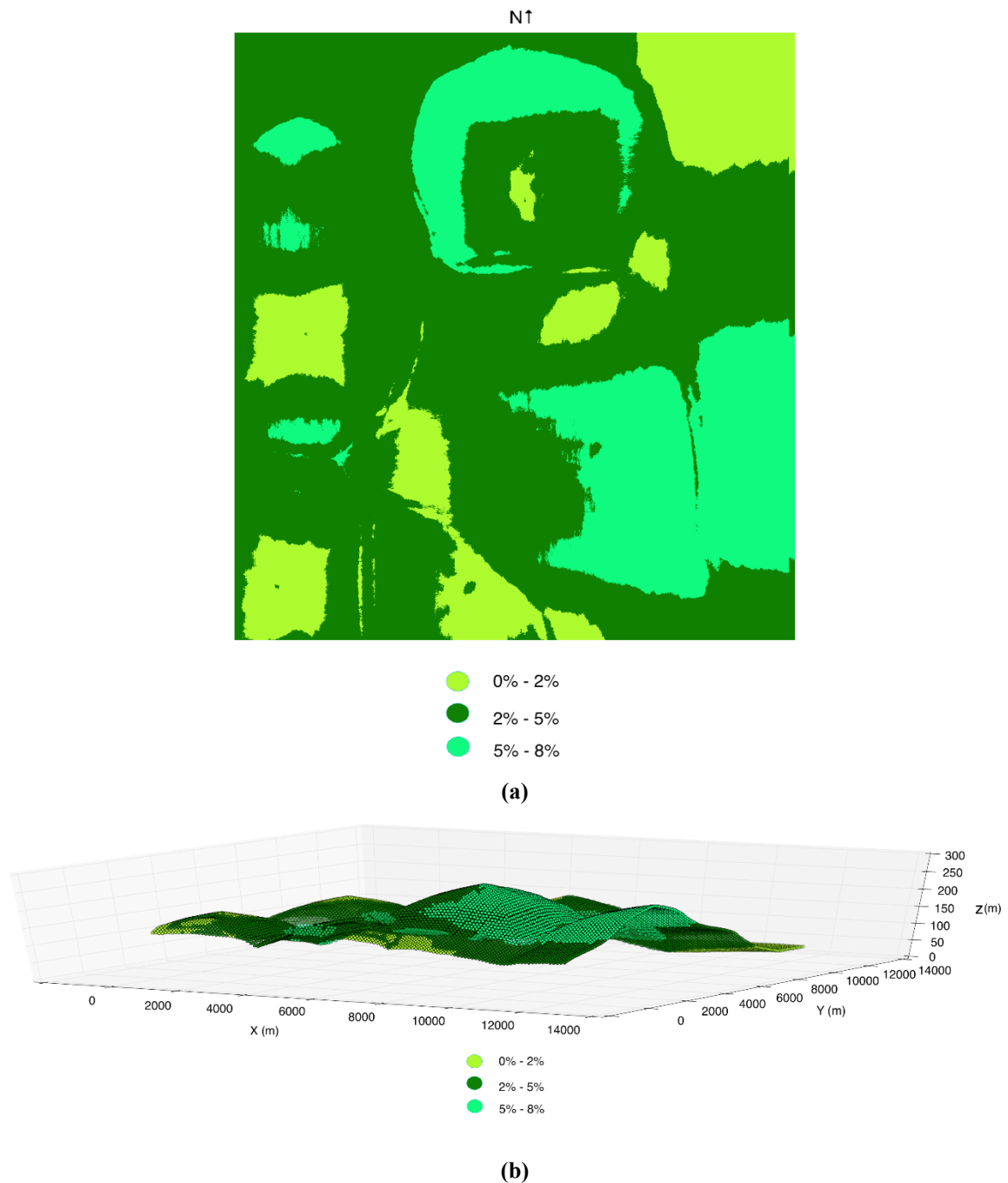


Figura 6.8 - Exemplo de um mapa de classificação de declives para a área em estudo ((a) duas dimensões, (b) três dimensões).

Mais uma vez, os valores anteriores são traduzidos num índice indicativo da inclinação, D . A valores elevados de D corresponde uma aptidão elevada para a construção, para valores mais baixos essa aptidão decresce.

Depois da avaliação dos três parâmetros anteriores, procede-se ao cálculo de um valor, ao qual se dá o nome de Índice de Aptidão (Figura 6.9), a variar entre 0 e 1, que não é mais que o somatório dos três índices anteriores (Tabela 6.2).

Tabela 6.2 – Índice de Aptidão indicador da adequabilidade do terreno à construção.

Índice de Aptidão	Intervalo de valores	Permissão máxima
0	[0, 0.25[Não se constrói
1	[0.25, 0.50[Densidade Baixa
2	[0.50, 0.75[Densidade Média
3	[0.75, 1]	Densidade Alta

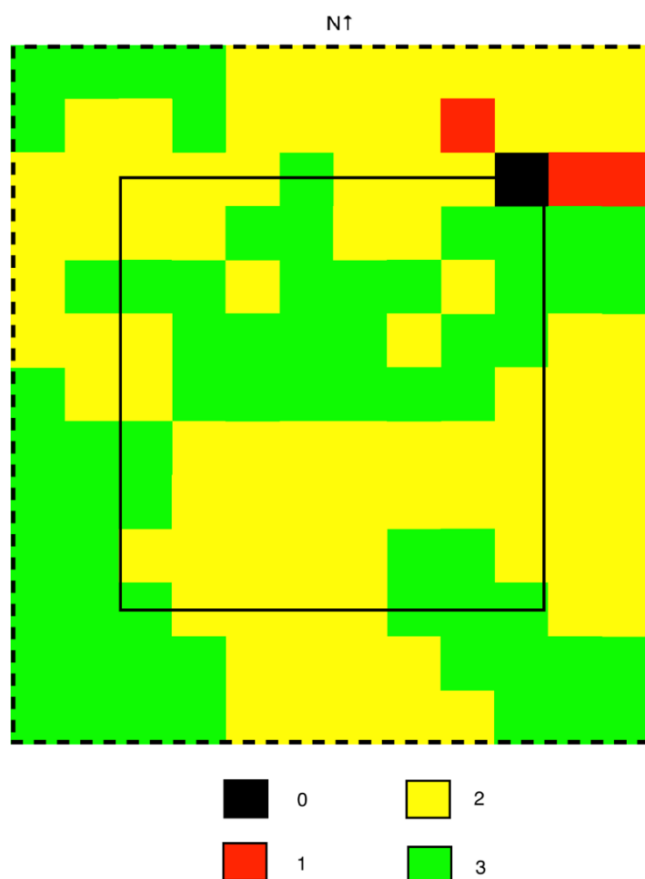


Figura 6.9 - Mapa representativo do Índice de Aptidão para a área em estudo.

Traçado das infraestruturas existentes

As infraestruturas urbanísticas são parte intrínseca de uma cidade dependendo toda a sua orgânica do adequado desempenho daquelas. Neste trabalho são consideradas as mais preponderantes do ponto de vista económico e cujo dimensionamento é mais complexo: o sistema de abastecimento de água, o sistema de drenagem de águas residuais e o sistema de transportes.

Dependendo do nível de pormenor com que se quer representar a cidade através de um grafo, assim os seus elementos constituintes, nós e arcos, representam níveis de detalhe diferentes. Para um nível de pormenorização elevado, pode-se obter um grafo com uma complexidade tal que se corre o risco de se tornar impossível de utilizar em termos práticos. Por outro lado, se se simplificar demasiado o grafo, este pode perder informação importante para a análise que se pretende fazer, deixando até de ser verosímil.

Relativamente às ligações constituintes das infraestruturas em análise, pode estabelecer-se a seguinte hierarquia: o nível mais baixo corresponde às vias de acesso local (no sistema de transportes) e às condutas de pequeno diâmetro (ramais de ligação nos sistemas de abastecimento e coletores nos sistemas de drenagem); e o nível mais elevado às vias coletoras e distribuidoras principais (no sistema de transportes) e às condutas de grande diâmetro (condutas que fazem a ligação entre os vários equipamentos e instalações nos sistemas de abastecimento e interceptores e emissários nas redes de drenagem). Neste trabalho assumem-se formas e estruturas espaciais urbanas consentâneas com o nível hierárquico mais elevado. Posto isto, estando a área da cidade perfeitamente definida e já localizados os centróides (x, y, z) de acordo com os pressupostos apresentados, são traçados, sobre aquela, eixos horizontais e verticais, considerando uma distância mínima entre eles, que originam uma forma urbana reticulada. Aqueles eixos são doravante, para facilitar a exposição, designados por eixos

principais ou estruturantes. Os traçados relativos às três infraestruturas consideradas no presente trabalho serão realizados com base nestes eixos e de acordo com o nível de pormenorização descrito.

Rede de transportes

O sistema de transportes permite a acessibilidade das áreas a servir, quer em termos de deslocação de pessoas (viagens casa-trabalho, casa-escola, casa-compras ou por outros motivos como sejam turismo, lazer, etc.), quer em termos de movimentação de mercadorias.

Só garantindo um bom funcionamento do sistema de transportes se assegura o desenvolvimento de um território e o bem-estar da população. O sistema de transportes compreende dois componentes: a oferta de transportes e a procura de transportes.

A oferta de transportes é assegurada pela infraestrutura fixa, ou seja, pela rede de transportes e pelos meios de transporte.

No presente trabalho a infraestrutura fixa estudada é constituída pelas vias colectoras e distribuidoras principais e o seu traçado coincide com os eixos principais ou estruturantes definidos anteriormente. Por sua vez os centróides são ligados, através do caminho mais curto àqueles ficando a rede completa. Define-se ainda o número de vias de cada eixo avaliando a população que eles servem, correspondendo a valores mais elevados de população servida um maior número de vias.

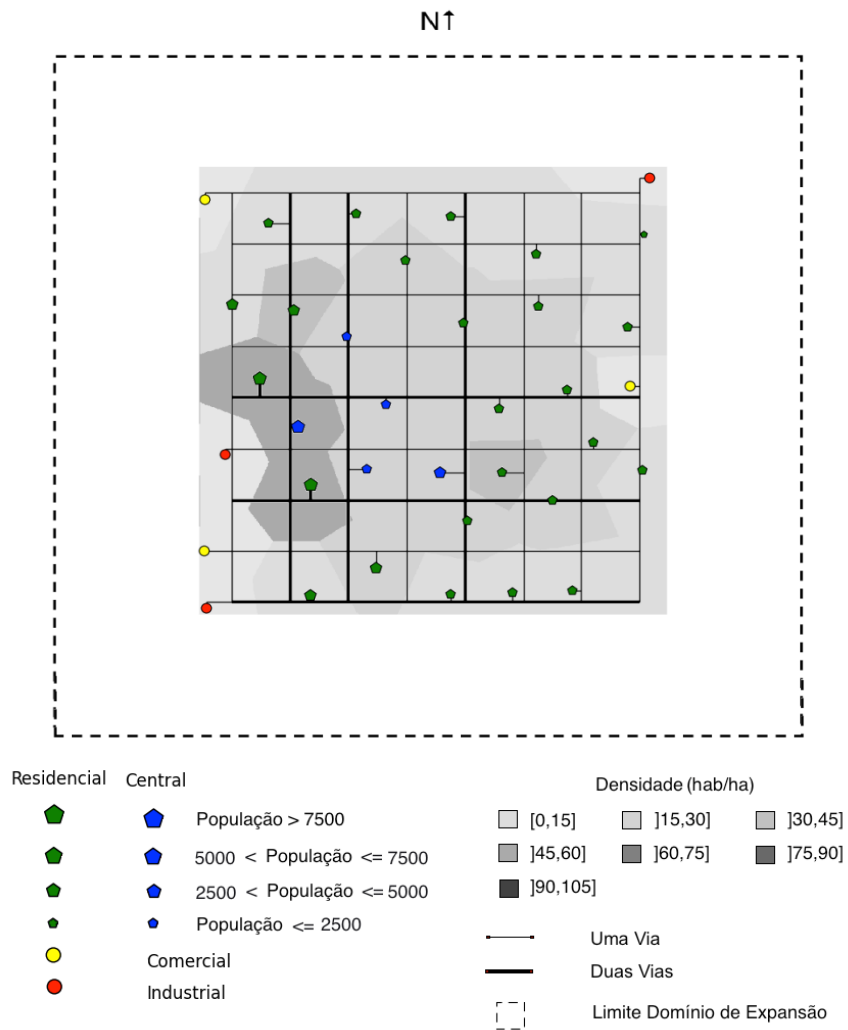


Figura 6.10 - Traçado da rede de transportes para a cidade existente.

Na Figura 6.10 bem como nas que se seguem já se encontram representados os centróides da cidade existente de acordo com a sua tipologia e população, estando as áreas de influência de cada centróide preenchidas de acordo com a sua densidade populacional.

No que diz respeito aos meios de transportes, não foi considerada de uma forma direta a diversidade dos veículos utilizados para as viagens. No entanto, quando necessário, como será visto a seguir, o que é feito é compatível com a consideração de vários meios de transporte pela utilização do conceito de Veículo Ligeiro Equivalente (VLE).

Relativamente à procura de transportes, para avaliar o número de viagens total entre um par de centróides construiu-se a matriz origem/destino (matriz O/D) relativa a uma hora-de-ponta com base nos indicadores de emprego e população dos centróides, utilizando-se a seguinte expressão (Modelo Gravitacional Sem Restrições):

$$T_{jk} = \alpha \frac{P_j E_k}{e^{\beta \overline{d}_{jk}}} \quad (6.2)$$

em que:

α e β são valores de referência

P_j é a população do centróide de origem

E_k é o emprego no centróide de destino

\overline{d}_{jk} é a distância entre a origem e o destino, medida sobre a rede (caminho mais curto).

Esta expressão calcula, como já foi referido, o número de viagens total entre dois centróides.

Após este cálculo, faz-se a transformação do número de viagens em VLE. Para tal, no presente trabalho dividem-se as entradas da matriz O/D por dois. Entende-se ser um valor apropriado para transformar viagens em VLE uma vez que se querem considerar como meios de transporte principais existentes, o veículo privado e o autocarro.

Em seguida, é necessário determinar o volume de tráfego em cada eixo e em cada sentido, para serem calculados os tempos de viagem, que como já se disse avaliam o nível de serviço prestado pela infraestrutura dos transportes.

Isto é feito de acordo com o princípio de equilíbrio de Wardrop. De acordo com este princípio, “o tráfego entre cada dois centróides é de tal forma que é impossível diminuir o tempo de qualquer viagem através da escolha de um novo caminho”. Dito de outra forma,

cada condutor minimiza o respetivo tempo de viagem tendo em conta as condições de circulação prevalectentes na rede.

A determinação da atribuição do tráfego de equilíbrio de uma rede de transportes pode ser realizada por vários métodos. O método utilizado no presente trabalho é o método Iterativo cujo algoritmo de esquematiza na Figura 6.11.

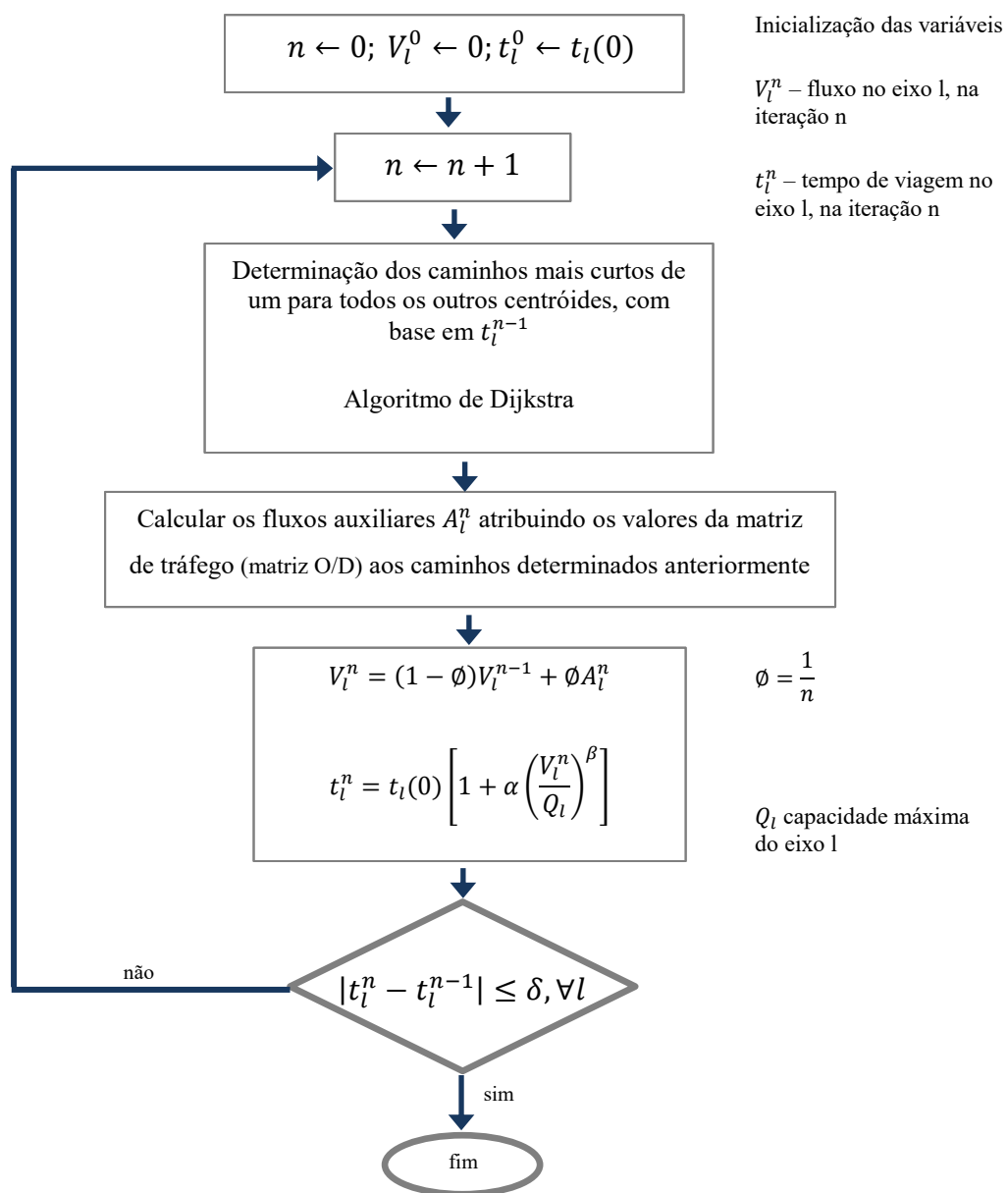


Figura 6.11 - Método Iterativo para atribuição de tráfego à rede de transportes.

Rede de drenagem de águas residuais

O sistema de drenagem de águas residuais tem como funções a recolha, o transporte, o tratamento e a devolução, ao meio recetor, em condições apropriadas, das águas residuais de um dado aglomerado populacional. É constituído, de uma forma genérica, pela rede de coletores (podendo esta ser interior aos edifícios – predial, ou pública), pela rede de interceptores e/ou emissários, e pelas instalações de tratamento e dispositivos de descarga final. Ao nível que se situou o presente estudo, foi considerada apenas a rede de drenagem pública incluindo coletores principais e interceptores.

Com base na topografia analisa-se qual a zona periférica mais baixa da cidade existente para aí ser considerada a localização do interceptor. Este interceptor drena a água residual do aglomerado populacional para um emissário, que conduzirá para posterior tratamento. Para o traçado da rede de coletores principais, os centróides são ligados, através do caminho mais curto, aos eixos principais ou estruturantes que, neste contexto, também se consideram como sendo traçados de coletores principais. Estes, por sua vez, são ligados ao interceptor principal referido anteriormente (Figura 6.12).

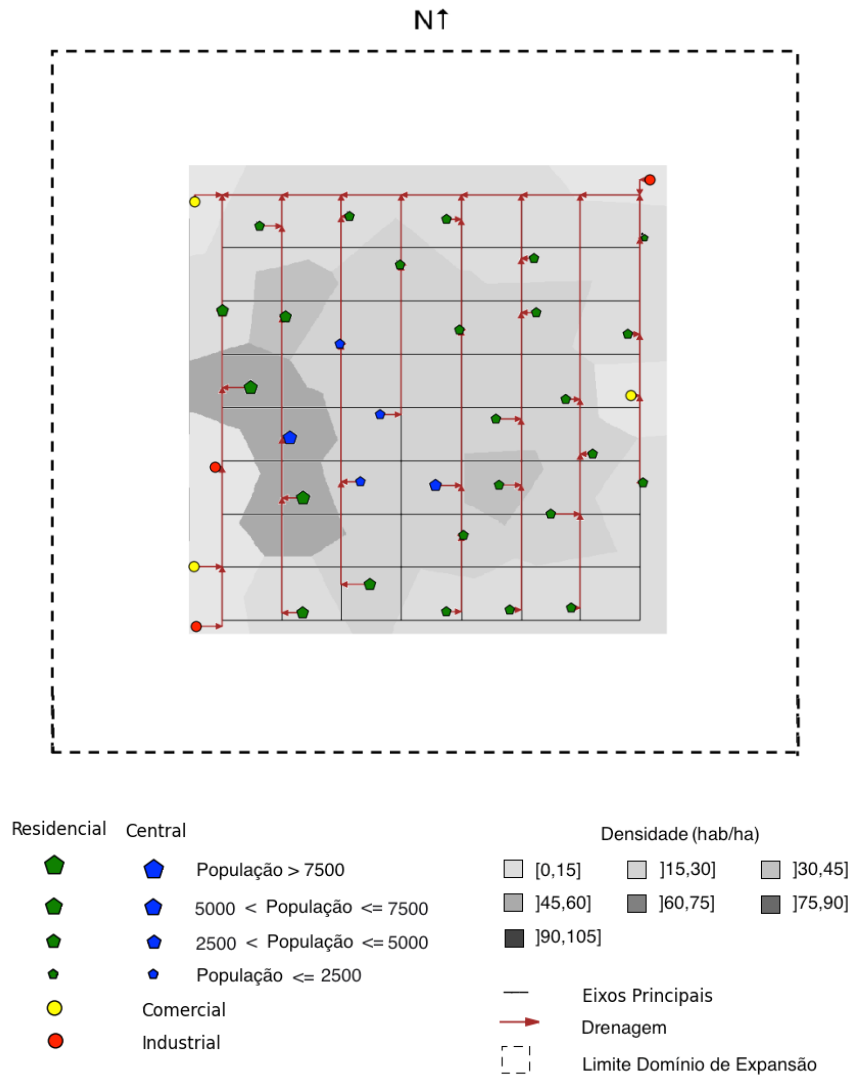


Figura 6.12 - Traçado da rede de drenagem para a cidade existente.

No presente trabalho, o dimensionamento da rede de drenagem é feito com base no Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Pluviais (RGSPDADAP).

Assim, apresenta-se uma síntese das expressões relativas ao seu dimensionamento e análise de acordo com o grau de detalhe que se está a considerar (utilizando a nomenclatura apresentada no Capítulo 4).

$$Q_{Dij} = Q_{Dpij} + Q_{Dinfiij} \quad (6.3)$$

em que:

$Q_{Dpij} = Q_{Dmdij} \times f_{Dpij}$	– caudal de ponta instantâneo (a este caudal são acrescidos os caudais localizados industriais e comerciais)
$Q_{Dmdij} = \frac{pop_{ij} \times cap \times 0.8}{24 \times 3600}$	– caudal médio anual
$f_{Dpij} = 1.5 + \frac{60}{pop_{ij}^{0.5}}$	– fator de ponta instantâneo
$Q_{Dinfiij} = Q_{Dmdij}$	– caudal de infiltração
cap	– capitação (litros/(diaxhabitante))
pop_{ij}	– população servida pelo troço que liga o nó i ao nó j (calculada com base em D_{popn} que por sua vez é calculada em consonância com o Índice de Aptidão determinado anteriormente, obedecendo ao definido na tabela 6.2)

$$H_{Dij} = (z_j - z_i) \quad (6.4)$$

em que:

z_j	– cota topográfica do nó j
z_i	– cota topográfica do nó i

$$D_{dij} = \max (D_{\min Vij}, D_{\min Iij}, D_{\min r}) \quad (6.5)$$

em que:

$D_{\min Vij} \geq \sqrt{\frac{8 \times Q_{Dij}}{V_{\max}(\theta - \sin \theta)}}$	– diâmetro mínimo para se fazer respeitar a velocidade máxima regulamentar, V_{\max}
$D_{\min Iij} \geq \left(\frac{20.159 \times Q_{Dij}}{k_s \sqrt{i_{\max}}} \right)^{3/8} \times \frac{\theta^{1/4}}{(\theta - \sin \theta)^{5/8}}$	– diâmetro mínimo para respeitar a inclinação máxima regulamentar, i_{\max}
k_s	– coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler
$\theta = 2 \arccos(1 - 2a)$	– a é a relação entre a altura máxima da lâmina líquida na secção de escoamento e o respetivo diâmetro
$D_{\min r}$	– diâmetro mínimo regulamentar

Rede de distribuição de água

O sistema de distribuição de água é outra das principais infraestruturas de um aglomerado urbano e tem como objetivo fornecer água às populações em quantidade e qualidade adequadas.

É constituído por diversos componentes, desde a origem até ao local de consumo. São eles: os sistemas de captação, de elevação, de tratamento, de adução, de armazenamento e as redes de distribuição. As redes de distribuição podem distinguir-se em dois tipos: a rede geral de distribuição e as redes de distribuição interiores dos edifícios.

O grau de detalhe com que se trabalha contempla apenas o reservatório de abastecimento e a rede geral de distribuição de água ao nível das condutas principais.

Para se fazer o traçado e dimensionamento da rede de distribuição de água, começa por se localizar o reservatório abastecedor. A sua localização é feita no ponto mais elevado da área em estudo. Em seguida, faz-se a ligação deste ao eixo principal ou estruturante mais próximo pelo caminho mais curto, passando este a fazer parte da rede de distribuição. Todos os outros centróides são ligados a este, igualmente através do caminho mais curto e tendo em consideração o traçado da rede de drenagem já feito anteriormente (Figura 6.13).

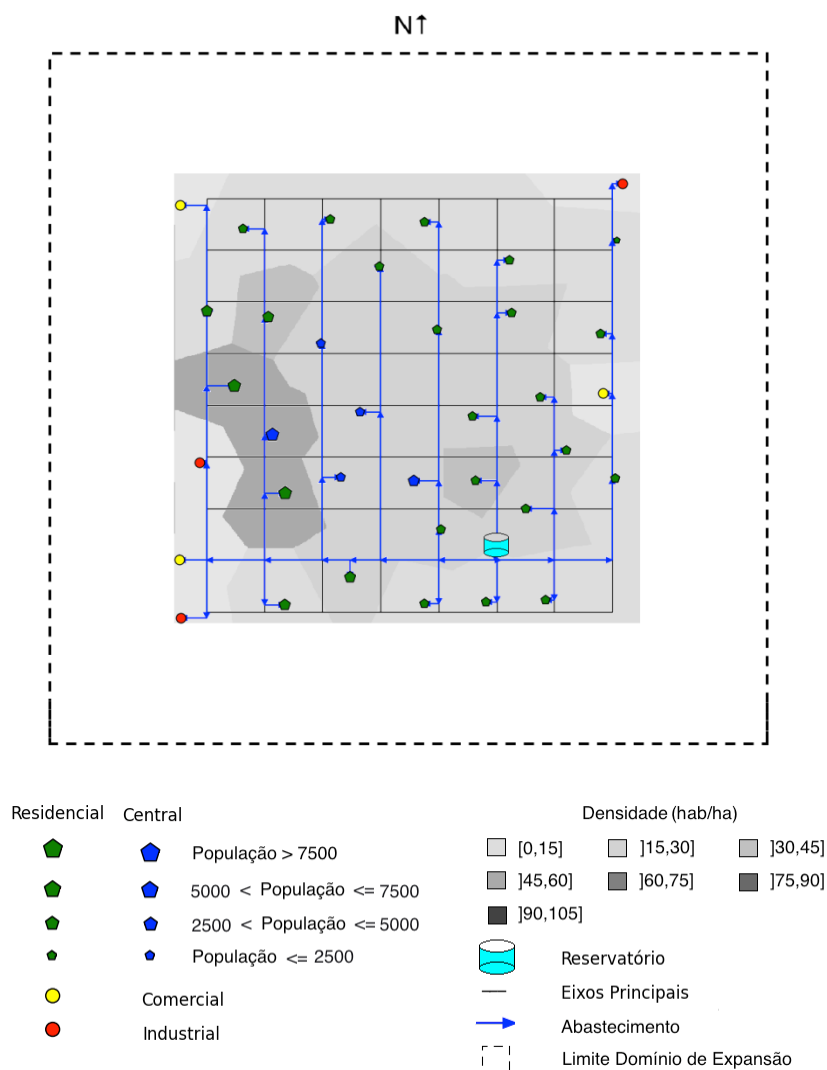


Figura 6.13 - Traçado da rede de abastecimento para a cidade existente.

A cota de soleira do reservatório é calcula por forma a respeitar as pressões máximas e mínimas na rede previstas no RGSPDADAP.

O restante dimensionamento da rede faz-se, também, com os pressupostos constantes no RGSPDADAP.

Apresenta-se a seguir, uma síntese das equações envolvidas no seu dimensionamento e análise em conformidade com o nível de pormenor com que se está a trabalhar (utilizando a nomenclatura apresentada no Capítulo 4).

$$Q_{Aij} = Q_{Apij} + Q_{fugasij} \quad (6.6)$$

em que:

$Q_{Apij} = Q_{Amdij} \times f_{ij}$	– caudal de ponta instantâneo (a este caudal são acrescidos os caudais localizados industriais e comerciais)
$f_{ij} = 2 + \frac{70}{\sqrt{pop_{ij}}}$	– fator de ponta instantâneo
$Q_{Amdij} = \frac{pop_{ij} \times cap}{24 \times 3600}$	– caudal diário médio anual
cap	– capitação (litros/(diaxhabitante))
$Q_{fugasij} = 10\% \times Q_{Amdij}$	– caudal de fugas
pop_{ij}	– população servida pela conduta que liga o nó i ao nó j, calculada com base em D_{popn} que por sua vez é calculada em consonância com o Índice de Aptidão determinado anteriormente, obedecendo ao definido na tabela 6.2

$$H_{Aj} = z_j + \frac{p_{mín}}{\gamma} - z_0 + \sum_{i=0}^j J_{ii+1} L_{Aii+1} \quad (6.7)$$

em que:

$J_{ii+1} = \left[\frac{Q_{Aii+1}}{D_{Aii+1}^{2.679}} \right]^{1/0.557}$	– perda de carga unitária na conduta que liga o centróide i ao centroide i+1 (fórmula de Scimemi para rugosidade igual a 0.01 mm, (Marques e Sousa, 2006))
z_0	– cota de soleira do reservatório abastecedor
z_j	– cota topográfica do nó j
$p_{mín}$	– pressão mínima regulamentar

$$D_{Aij} = \left[\frac{4 \times Q_{Aij}}{0.127 \times \pi \times 10^{-6}} \right]^{1/2.4} \quad (6.8)$$

em que:

Q_{Aij}	– caudal de dimensionamento que liga o nó i ao nó j, já definido anteriormente
-----------	--

6.3 Implementação do Algoritmo do Recozimento Simulado

6.3.1 Escolha da Solução Inicial e Geração das Soluções Candidatas

A implementação do algoritmo do Recozimento Simulado tem início com a escolha da solução inicial e com a construção de um esquema de vizinhança, isto é, o modo como se geram as soluções candidatas.

No caso do problema em análise cada solução é constituída pela cidade existente, construída a montante de acordo com o exposto no Subcapítulo 6.2 e pelos novos centróides (centros geométricos das possíveis áreas para expansão) pelos quais será distribuído o aumento da população.

Para a escolha da solução inicial e conhecido o crescimento populacional, começa por ser selecionada aleatoriamente a localização do primeiro centróide. Em seguida é-lhe atribuída uma população de acordo com o Índice de Aptidão definido e calculado no Subcapítulo 6.2. Aquele índice está relacionado com os valores de densidade populacional permitida em cada área. Por esta razão, a densidade será atribuída a cada área de expansão aleatoriamente respeitando o valor máximo permitido. A seguir é selecionada uma nova localização e procede-se da mesma forma. O processo termina quando todo o aumento de população estiver atribuído. Desta forma não se conhece à partida o número de centróides novos que vão fazer parte da solução inicial.

Pelos novos centróides distribui-se também novo emprego mantendo a proporção presente na cidade existente. Aos novos centróides é atribuído emprego não básico. O acréscimo de emprego básico é atribuído aos centróides da cidade existente onde já estava previsto este tipo de emprego.

Após a localização dos novos centróides tem de se infraestruturar o domínio de expansão por forma a colmatar as necessidades dos novos habitantes. Para tal e quando necessário, começa

por ser feito o prolongamento dos eixos principais ou estruturantes previstos na cidade existente. Os novos centróides são ligados àqueles ou às redes existentes pelos mesmos procedimentos previstos para os centróides constituintes da cidade fazendo, sempre que possível, coincidir os traçados das três redes em análise.

Estando os traçados completos, é feito o dimensionamento dos novos troços e avalia-se se as redes existentes necessitam de reforço/redimensionamento. O dimensionamento e o redimensionamento das infraestruturas são feitos, como foi referido, com base no regulamento em vigor.

A solução inicial assim construída ainda não passou pelo algoritmo de otimização pelo que o valor da função de custo que lhe está associado será, em princípio, elevado. Este valor não tem unidades uma vez que, como já foi explicado anteriormente, aquela função é normalizada, pois nela estão envolvidos componentes com ordens de grandeza díspares e unidades distintas.

A partir da solução inicial é necessário agora proceder à geração das soluções candidatas que dependerão do esquema de vizinhança adotado.

Já se mencionou que o rearranjo da solução corrente deve ser concretizado através de pequenas perturbações, para que se possam explorar todas as soluções possíveis. Se a alteração na solução corrente for excessiva, pode provocar um “salto” significativo na função, correndo-se o risco de se perder, entretanto, a análise de uma boa solução.

Por outro lado, o tempo de execução computacional deve ser gasto em quantas mais iterações melhor, havendo que tomar providências nesse sentido. Por exemplo, na avaliação de uma dada solução candidata, não se deve recalculiar todo o valor da função objetivo, mas apenas as partes que diferem da solução corrente para aquela. Para tal, é imprescindível ter uma noção

precisa das alterações e repercussões na solução candidata, a que leva o rearranjo previsto pelo esquema de vizinhança adotado.

Os rearranjos considerados estão intimamente relacionados com o tipo de variáveis envolvidas no problema. O presente problema engloba variáveis contínuas como sejam os comprimentos dos troços constituintes das redes e os caudais que aí circulam, variáveis discretas como sejam os diâmetros que têm de ser escolhidos nas gamas comerciais disponíveis, e variáveis inteiras como sejam a população e o número dos veículos que circulam na rede de transportes. Além disso, engloba variáveis binárias que traduzem, por exemplo, a escolha ou não de uma determinada localização para uma nova área de expansão. Cada solução do problema é uma combinação destas variáveis e tem de respeitar as respetivas restrições.

Muitas eram as possibilidades de alteração da solução corrente (começando pela inicial) para se criar uma solução candidata, conjugando intervenções ao nível daqueles diferentes tipos de variáveis. O esquema de vizinhança adotado intervém ao nível da localização dos centróides candidatos prevendo três tipos de alteração:

- 1.º Tipo – eliminar um centróide incluído na solução corrente e considerar outro centróide capaz de albergar a população do primeiro;
- 2.º Tipo – eliminar dois centróides e abrir apenas um que consiga conter a população conjunta dos dois anteriores;
- 3.º Tipo – eliminar um centróide e abrir dois novos centróides distribuindo-lhes a população de acordo com os procedimentos descritos anteriormente.

O esquema de vizinhança resulta da combinação destes três tipos de rearranjo isto é, aleatoriamente, em cada iteração, escolhe-se uma destas possibilidades para gerar a solução candidata.

6.3.2 Processo de Arrefecimento

Outra questão de crucial importância aquando da implementação do algoritmo do Recozimento Simulado é o Processo de Arrefecimento, relativamente ao qual são importantes quatro aspetos. Um deles prende-se com a escolha da temperatura inicial.

Relembrando a descrição do critério de Metropolis, sendo c a função de custo e \mathcal{S}_p o conjunto de soluções possíveis ($s \in \mathcal{S}_p$) e estando-se a tratar, por exemplo, de um problema de minimização, gerada aleatoriamente uma solução candidata, s' , de custo $c(s')$, a partir da solução s , a transição de s para s' vai ser realizada com probabilidade $p = \min\{1, \exp(\Delta c / \theta)\}$, em que $\Delta c = c(s) - c(s')$, sendo θ o valor do parâmetro de controlo.

Ora, como facilmente se observa pela expressão de Metropolis, pretende-se que inicialmente θ seja suficientemente elevado para que mesmo soluções muito fracas sejam aceites. Isto é, o valor inicial de θ deve ser escolhido de tal forma que permita que todo o espaço de soluções seja explorado.

A expressão utilizada para o cálculo da temperatura inicial na presente tese é a seguinte (Cunha, 1999, Cunha and Sousa, 2001):

$$\theta_1 = -\frac{0.1c_0}{\ln a} \quad (6.9)$$

em que:

c_0 é o custo da solução inicial

a é a elasticidade de aceitação.

A elasticidade de aceitação define-se como sendo a probabilidade de aceitação de uma solução cujo custo é superior ao da solução inicial em uma dada percentagem. Com esta expressão, é calculada uma temperatura tal que, inicialmente, é aceite uma percentagem de soluções cujo custo é superior em 10 % ao da solução inicial com probabilidade igual a a . Relativamente ao valor de a é necessário que este seja suficientemente elevado, para permitir uma aceitação inicial de soluções que cubra todo o espaço de soluções possíveis. Analisando o critério de Metropolis verifica-se que tal só é possível com um valor de temperatura inicial elevado. Kirkpatrick sugeriu que os valores anteriores fossem definidos de forma a garantir uma taxa de aceitação inicial (número de soluções aceites no critério de Metropolis/ número de soluções candidatas) de 80 %. Nestas condições, com uma temperatura inicial elevada, a aceitação de uma nova solução é muito provável e a solução final tende a tornar-se independente da final.

Posteriormente, tem de ser definida a forma como o valor do parâmetro θ vai ser reduzido. Na presente tese este arrefecimento é feito gradualmente segundo a seguinte expressão: (arrefecimento geométrico):

$$\theta_{k+1} = r \times \theta_k \tag{6.10}$$

em que:

r é a taxa ou coeficiente de arrefecimento.

É graças ao parâmetro r que se processa a diminuição do parâmetro de controlo. Se o seu valor for muito elevado significa que se arrefece muito devagar e se testam muitos patamares de temperatura, o que normalmente implicará um aumento no tempo de resolução. Se r tomar um valor mais baixo arrefece-se mais depressa e o tempo de resolução será geralmente menor. Na presente tese este parâmetro toma um valor constante, isto é, ao longo do algoritmo não varia, embora existam implementações do Recozimento Simulado em que este parâmetro vai variando ao longo da execução do algoritmo.

Outro parâmetro envolvido no Processo de Arrefecimento é o número mínimo de iterações em cada temperatura, n_1 , isto é, o número que define a dimensão da cadeia de Markov.

Como já foi referido, para um dado valor do parâmetro de controlo, o valor de $\exp(\Delta c/\theta)$ do critério de Metropolis, é comparado com um número aleatório entre 0 e 1. Se este número é menor que a exponencial, então a nova solução é aceite, caso contrário é rejeitada. Este processo será repetido, para aquele valor do parâmetro de controlo, um determinado número de vezes, no mínimo n_1 vezes, até a solução já não conseguir ser melhorada (estado estacionário atingido) após o que se procederá à diminuição da temperatura.

Neste trabalho, aquele número é definido da seguinte forma: define-se um número mínimo de iterações (n_1) que têm de ser feitas obrigatoriamente e ao fim das quais se avalia o custo ótimo em relação ao encontrado anteriormente e o custo médio das n_1 iterações, se não houve

melhoramento a temperatura diminui. Caso contrário, as iterações continuam àquela temperatura. Verifica-se, desta forma, que o algoritmo passa mais tempo em temperaturas mais elevadas, quando ainda está a trabalhar com soluções longe do ótimo. Este facto contribui para que o algoritmo não caia em ótimos locais.

Relativamente ao critério de paragem, o quarto parâmetro interveniente no Processo de Arrefecimento, deverá ser tal que permita que o algoritmo “perceba” quando é que ainda se está a melhorar a solução e por isso ainda não deva interromper o processo de busca. Neste sentido, o critério de paragem utilizado nesta tese consiste em definir um parâmetro, n_2 , que é o número de patamares de temperatura consecutivos em que não há melhoramento do custo ótimo ou do custo médio.

Em termos práticos, se o algoritmo até ao patamar de temperatura n_2 melhorar a solução, então a contagem de n_2 passa a zero e o algoritmo continua o processo de busca.

A forma como estes parâmetros se interligam e se desenvolve o Processo de Arrefecimento é apresentada na Figura 6.14.

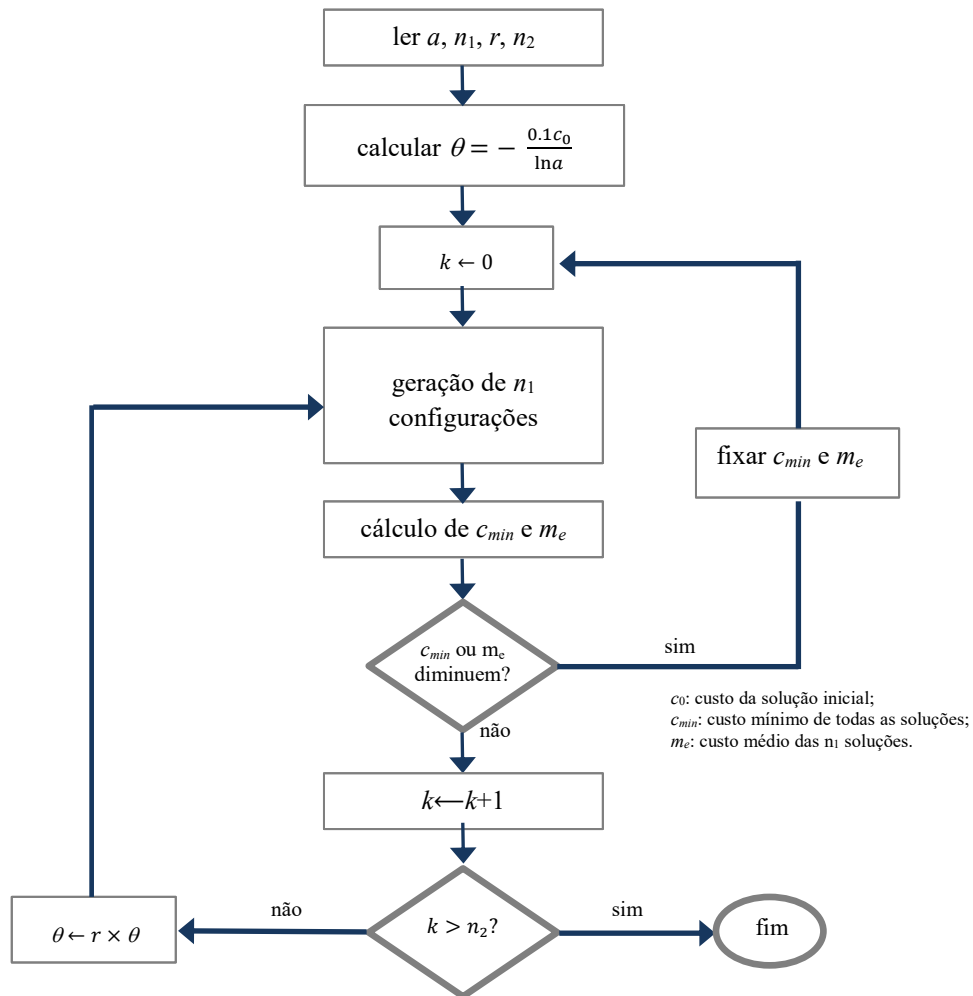


Figura 6.14 - Processo de Arrefecimento (adaptado de Johnson *et al.* (1989)).

Adoptado o Processo de Arrefecimento, ter-se-á de proceder à calibração dos parâmetros nele envolvidos, a fim de encontrar os seus melhores valores e a sua melhor conjugação, por forma a obter a melhor solução possível, quer em termos do valor da função objetivo, que se pretende minimizar, quer em termos de tempo de resolução.

6.3.3 Calibração do Algoritmo

Como se verificou na secção anterior estão envolvidos na implementação do algoritmo do Recozimento Simulado, mais propriamente no Processo de Arrefecimento, um conjunto de parâmetros cujos valores têm agora de ser calibrados.

A calibração consiste na procura da melhor combinação daqueles parâmetros, para que, em conjugação com o método de aproximação da Fronteira de Pareto, se obtenha o conjunto representativo das melhores soluções, quer em termos do valor da função objetivo, quer em termos de tempo de resolução.

E é precisamente para encontrar um conjunto de valores que funcione bem na aproximação da Fronteira de Pareto que é necessário fazer a calibração para várias combinações de pesos.

Começam assim por serem definidas quatro combinações de pesos de acordo com o exposto no Subcapítulo 5.3, para os componentes incluídos na função objetivo ($f_A(X)$, $f_D(X)$ e $f_T(X)$, apresentados no Subcapítulo 4.2).

Tabela 6.3 – Combinações de pesos.

Combinação de pesos	Transportes	Abastecimento	Drenagem
1	0.33(3)	0.33(3)	0.33(3)
2	0.50	0.25	0.25
3	0.25	0.50	0.25
4	0.25	0.25	0.50

Em cada execução do algoritmo e para as quatro combinações apresentadas na Tabela 6.3, a cidade considerada e respetivo crescimento populacional são os mesmos variando apenas o conjunto de parâmetros adotados no Processo de Arrefecimento.

Assim, para cada uma das combinações de pesos anteriores fizeram-se cem execuções do algoritmo. Em cada execução foi gerado aleatoriamente, dentro de um intervalo predefinido,

cada um dos parâmetros envolvidos no Processo de Arrefecimento, guardando-se o melhor valor da função objetivo e o respetivo tempo de resolução.

Os intervalos predefinidos foram balizados de acordo com valores de referência já utilizados em trabalhos anteriores com provas de darem bons resultados. Os intervalos considerados foram os seguintes:

$$a = [0.5, 0.99]$$

$$r = [0.5, 0.99]$$

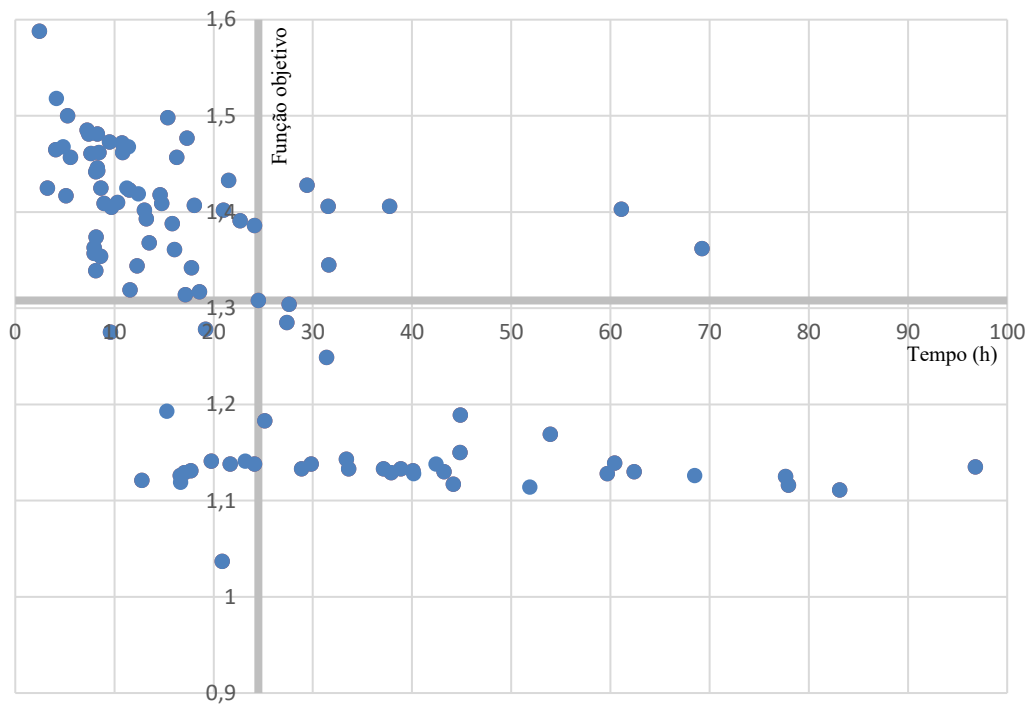
$$n_1 = [50, 150]$$

$$n_2 = [5, 12]$$

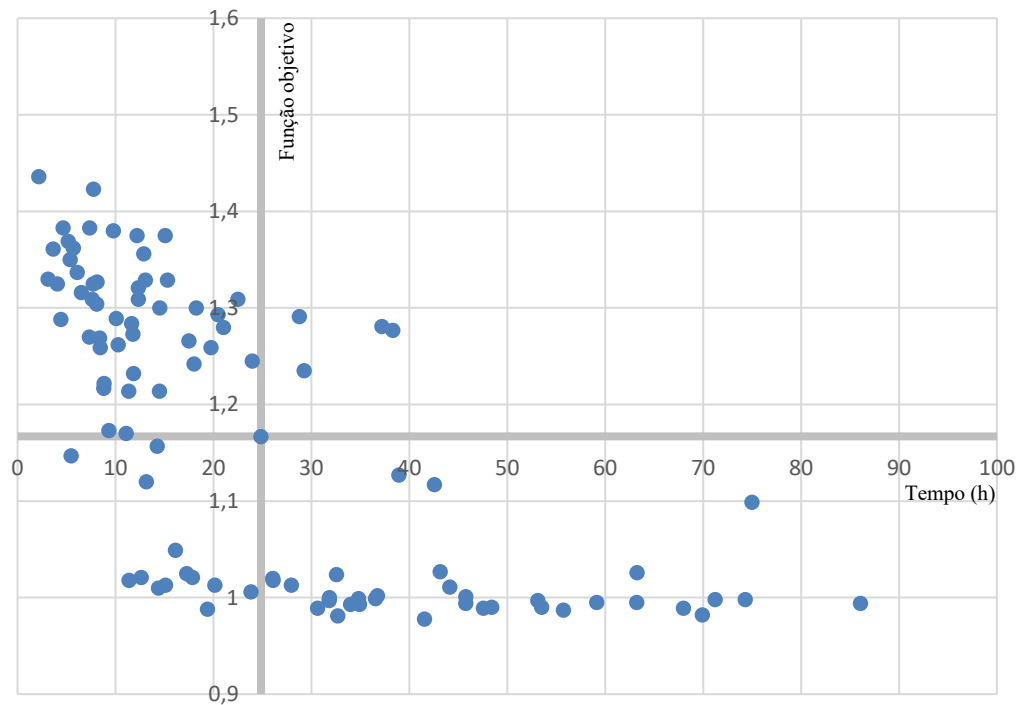
Com os resultados das execuções descritas construíram-se os gráficos apresentados na Figura 6.15.

No eixo das abcissas está representado o tempo de execução, no eixo das ordenadas o valor da função objetivo, sendo na origem dos eixos marcados os valores médios das cem execuções. Os pontos obtidos apresentam claramente duas tendências na sua distribuição. Uma delas é a concentração elevada no segundo quadrante de cada um dos gráficos. Neste quadrante os tempos de execução são curtos e os valores da função objetivo, e portanto os custos, são elevados. Através de uma observação cuidada dos parâmetros relativos ao Processo de Arrefecimento que lhes deram origem, verifica-se que estão associados a valores da taxa de arrefecimento baixos e a critérios de paragem pouco exigentes.

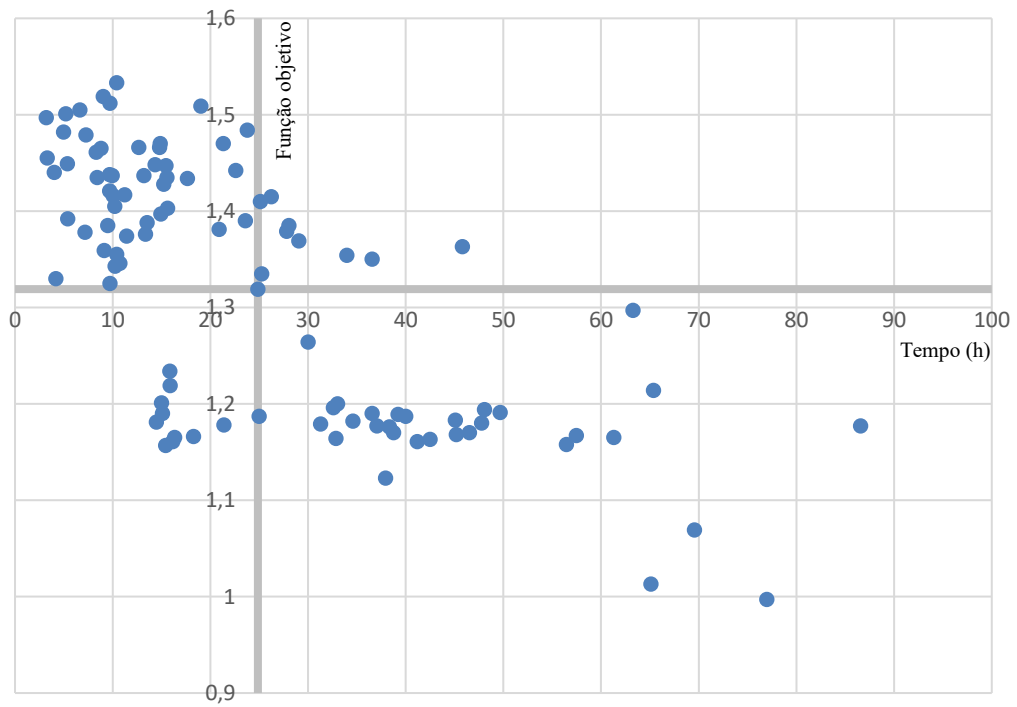
Outra tendência que ressalta da observação dos gráficos é a nuvem de pontos paralela ao eixo das abcissas, uma percentagem ainda no terceiro quadrante, mas a grande maioria no quarto quadrante. Desta feita estes pontos estão associados a menores valores da função objetivo (menores custos) e à medida que se vai passando do terceiro para o quarto quadrante a valores crescentes do tempo de execução.



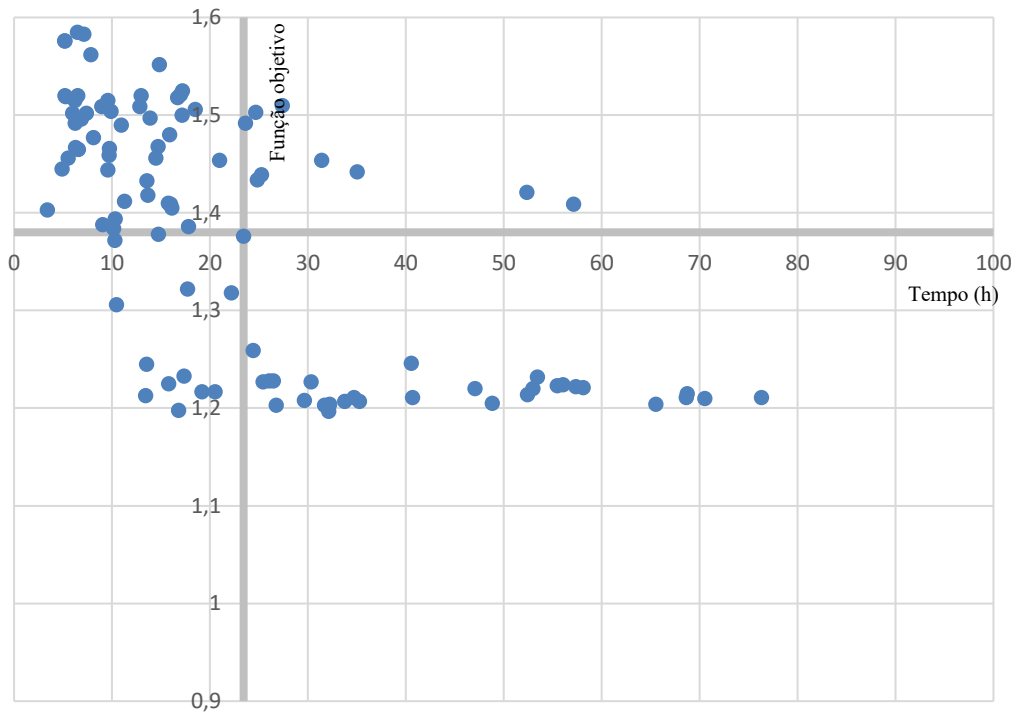
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.15 - Resultados das cem execuções do algoritmo relativos às quatro combinações de pesos ((a) combinação de pesos 1, (b) combinação de pesos 2, (c) combinação de pesos 3, (d) combinação de pesos 4).

Para cada combinação de pesos ordenaram-se por ordem crescente dos valores da função objetivo os resultados das cem execuções e analisou-se o conjunto das vinte e cinco primeiras, observando-se criteriosamente os parâmetros que lhes estão associados.

Tabela 6.4 – Resultados das vinte e cinco melhores execuções do algoritmo em relação ao valor da função objetivo para a combinação de pesos 1.

<i>a</i>	<i>r</i>	<i>n</i> ₁	<i>n</i> ₂	Taxa de aceitação inicial	Tempo (h)	Função objetivo
0.8	0.5	30	6	98.33	20.85	1.037
0.9	0.6	90	12	99.44	83.11	1.111
0.9	0.7	100	10	99.00	51.88	1.114
0.8	0.6	70	6	95.71	77.93	1.116
0.6	0.8	80	4	90.71	44.14	1.117
0.9	0.6	30	10	100.00	16.65	1.119
0.9	0.6	40	6	98.33	12.76	1.121
0.7	0.8	100	10	92.83	77.64	1.125
0.95	0.7	100	8	98.78	68.47	1.126
0.7	0.7	40	4	93.75	16.64	1.126
0.7	0.5	80	8	90.50	40.16	1.128
0.8	0.7	70	10	95.71	59.68	1.128
0.6	0.6	50	10	85.33	17.04	1.129
0.6	0.6	90	10	87.78	37.91	1.129
0.95	0.8	70	8	99.18	43.22	1.130
0.99	0.5	70	6	99.29	62.40	1.130
0.95	0.5	30	10	97.78	17.70	1.131
0.5	0.5	90	6	82.22	40.09	1.131
0.8	0.5	90	4	96.67	33.60	1.133
0.95	0.6	100	4	99.33	37.11	1.133
0.5	0.6	60	8	87.50	28.86	1.133
0.95	0.8	70	8	99.29	38.87	1.133
0.6	0.7	90	4	92.22	96.80	1.135
0.5	0.7	60	10	90.83	42.43	1.138
0.6	0.8	30	8	93.33	21.65	1.138

Tabela 6.5 – Resultados das vinte e cinco melhores execuções do algoritmo em relação ao valor da função objetivo para a combinação de pesos 2.

<i>a</i>	<i>r</i>	<i>n</i> ₁	<i>n</i> ₂	Taxa de aceitação inicial	Tempo (h)	Função objetivo
0.6	0.6	90	10	92.22	41.56	0.978
0.5	0.6	60	8	83.00	32.68	0.981
0.5	0.5	90	6	88.61	69.93	0.982
0.99	0.7	90	10	100.00	55.74	0.987
0.5	0.6	60	6	92.50	19.37	0.988
0.5	0.7	60	10	83.33	30.62	0.989
0.7	0.95	50	10	97.00	68.00	0.989
0.95	0.8	70	8	98.86	47.55	0.989
0.7	0.5	80	8	92.81	53.50	0.990
0.8	0.7	70	10	95.71	48.40	0.990
0.95	0.8	70	10	100.00	34.91	0.993
0.6	0.5	50	8	87.33	33.99	0.993
0.9	0.6	90	12	97.78	86.07	0.994
0.95	0.8	70	8	99.59	45.75	0.994
0.7	0.8	100	10	92.00	63.22	0.995
0.95	0.6	100	4	99.33	59.13	0.995
0.99	0.7	90	6	100.00	53.12	0.997
0.95	0.5	50	4	100.00	31.80	0.997
0.9	0.7	100	10	98.00	71.22	0.998
0.5	0.9	50	8	85.50	74.28	0.998
0.7	0.8	60	6	92.50	34.80	0.999
0.95	0.6	90	4	99.44	36.53	0.999
0.7	0.6	60	4	92.78	31.83	1.000
0.9	0.5	70	8	98.10	45.76	1.001
0.5	0.5	90	6	86.67	36.75	1.002

Tabela 6.6 – Resultados das vinte e cinco melhores execuções do algoritmo em relação ao valor da função objetivo para a combinação de pesos 3.

<i>a</i>	<i>r</i>	<i>n</i> ₁	<i>n</i> ₂	Taxa de aceitação inicial	Tempo (h)	Função objetivo
0.7	0.8	100	10	91.00	76.95	0.997
0.6	0.7	90	4	88.15	65.09	1.013
0.9	0.7	100	12	98.50	69.54	1.069
0.95	0.6	90	4	99.21	37.93	1.123
0.95	0.5	30	10	100.00	15.41	1.157
0.8	0.6	70	6	93.33	56.43	1.158
0.8	0.5	90	4	97.22	41.18	1.161
0.9	0.6	40	6	96.25	16.14	1.161
0.6	0.5	50	8	91.00	42.48	1.163
0.5	0.6	60	8	84.17	32.85	1.164
0.5	0.6	50	8	87.33	16.32	1.165
0.5	0.5	90	6	89.63	61.28	1.165
0.6	0.8	30	8	88.33	18.25	1.166
0.99	0.5	70	6	100.00	57.47	1.167
0.95	0.6	100	4	99.50	45.17	1.168
0.99	0.7	90	10	98.89	46.51	1.170
0.95	0.5	50	4	98.67	38.73	1.170
0.9	0.5	70	8	97.14	38.33	1.176
0.6	0.8	80	4	85.63	37.05	1.177
0.9	0.6	90	10	97.11	86.56	1.177
0.5	0.5	60	4	93.33	21.38	1.178
0.6	0.6	90	10	89.63	31.29	1.179
0.95	0.8	70	10	98.93	47.77	1.180
0.5	0.6	60	6	92.22	14.45	1.181
0.8	0.5	50	8	94.67	34.58	1.182

Tabela 6.7 – Resultados das vinte e cinco melhores execuções do algoritmo em relação ao valor da função objetivo para a combinação de pesos 4.

<i>a</i>	<i>r</i>	<i>n</i> ₁	<i>n</i> ₂	Taxa de aceitação inicial	Tempo (h)	Função objetivo
0.7	0.8	60	6	92.50	32.13	1.197
0.6	0.6	50	10	92.00	16.78	1.198
0.9	0.5	70	8	97.14	31.70	1.203
0.5	0.6	60	8	85.00	26.74	1.203
0.8	0.5	50	8	98.00	32.22	1.204
0.6	0.7	90	4	88.33	65.52	1.204
0.99	0.7	90	10	100.00	48.82	1.205
0.6	0.5	50	8	90.67	33.77	1.207
0.5	0.5	90	6	86.11	35.26	1.207
0.9	0.8	40	8	97.50	29.63	1.208
0.8	0.6	70	6	94.29	70.51	1.210
0.7	0.5	80	8	93.13	40.68	1.211
0.7	0.8	100	12	93.33	76.31	1.211
0.8	0.5	90	4	95.93	34.70	1.211
0.9	0.6	90	10	98.22	68.62	1.211
0.9	0.6	30	10	96.67	13.43	1.213
0.8	0.7	70	10	96.43	52.42	1.214
0.95	0.8	70	6	99.64	68.72	1.215
0.9	0.6	40	6	96.25	20.53	1.217
0.5	0.6	60	6	84.17	19.18	1.217
0.95	0.7	100	8	99.00	47.07	1.220
0.6	0.6	90	10	88.89	52.97	1.220
0.5	0.5	90	6	85.33	58.09	1.221
0.95	0.8	70	8	98.57	57.34	1.222
0.9	0.7	100	10	99.00	55.45	1.223

Neste intervalo de vinte e cinco valores *e*, portanto, de vinte e cinco conjuntos de parâmetros envolvidos no Processo de Arrefecimento, verificou-se que aquele que origina melhores resultados fazendo um balanço entre o valor da função objetivo e o tempo de execução considerado razoável para a dimensão do problema em análise e em simultâneo para as quatro combinações dos pesos foi o seguinte: $a = 0.6$; $r = 0.6$; $n_1 = 90$ e $n_2 = 10$.

Como já foi referido, na literatura é recomendado que a temperatura inicial seja definida de tal forma que sejam aceites cerca de 80 % das soluções propostas, isto é, deve ser de tal forma que inicialmente a percentagem de aceitação seja igual a este valor.

Verifica-se nas Tabelas 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7 que, para um valor de $a = 0.6$, as percentagens de aceitação inicial são sempre superiores a 80 %, o que vai de encontro às recomendações da literatura.

Por outro lado, a taxa de arrefecimento que consta do conjunto de parâmetros escolhido, $r = 0.6$, não é elevada, não podendo ser considerado um arrefecimento lento, no entanto verifica-se que para valores superiores de r os tempos de resolução aumentam, sendo esse aumento da ordem das horas para combinações com os mesmos valores de n_1 e n_2 . Posto isto, entendeu-se razoável adotar o valor de $r = 0.6$ uma vez que permite um bom compromisso entre valor da função objetivo e tempo de resolução.

Para o valor de n_2 e para o valor de n_1 , com conjuntos de parâmetros onde estes valores são incrementados relativamente aos utilizados nas análises anteriores, o valor da função objetivo pouco melhora e o tempo de resolução aumenta, mais uma vez na ordem das horas.

6.3.4 Robustez do Algoritmo

Já foi dito que querendo tratar o problema apresentado com todo o seu realismo os métodos tradicionais e exatos de otimização não são eficazes. Na presente tese trabalha-se com um método heurístico que, sendo bem implementado (parametrizado), permite obter boas soluções mas não necessariamente as melhores possíveis. Um outro aspeto que caracteriza o método selecionado é o facto de ser aleatório, o que faz com que, em execuções sucessivas, o resultado a que se chega pode não ser sempre o mesmo.

Com efeito, o algoritmo do Recozimento Simulado, que foi apresentado no Capítulo 5, tem dado bons resultados na resolução de problemas com as características do que se pretende resolver, mas só sob condições extremamente exigentes é possível provar a respetiva convergência para um ótimo global. Esta convergência exigiria tempos de resolução bastante

elevados que não são concretizáveis na prática. Neste sentido, são tomadas algumas opções para gerar um algoritmo que permita obter resultados num tempo de resolução aceitável e que chegue a uma solução de boa qualidade. São exemplo disso a escolha dos parâmetros envolvidos no Processo de Arrefecimento, nomeadamente a taxa de arrefecimento, o número de soluções avaliadas em cada patamar de temperatura e o critério de paragem adotado.

Assim, depois de construído o algoritmo que corresponde ao modelo formulado, e antes de se fazer a análise dos respetivos resultados, torna-se primordial verificar a robustez do algoritmo. Só fazendo prova desta é possível ter confiança nos resultados obtidos.

Por outro lado, outra análise que é feita neste contexto é a avaliação do esforço computacional, onde o tempo de resolução é o principal parâmetro estudado (realizada mais adiante na Secção 6.3.5).

Para fazer as análises referidas são escolhidos e construídos vários cenários dentro da infinidade de possibilidades existente. Escolhem-se os mais apropriados às análises que se pretendem fazer sendo descritos pormenorizadamente para cada situação.

Nesta análise e nas que se seguem e para as respetivas execuções do algoritmo adotam-se os pressupostos apresentados para geração de uma cidade hipotética, escolha da solução inicial e geração das soluções candidatas. São também utilizados os valores para os parâmetros do Processo de Arrefecimento resultantes da calibração feita anteriormente.

O cenário escolhido para fazer a análise da robustez do algoritmo é o apresentado na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Cenário para avaliação da robustez do algoritmo.

Cidade	Crescimento populacional	Combinação de Pesos
150000 habitantes	30%	combinação 1

É gerada uma cidade de dimensão considerada média, com 150000 habitantes, que sofre um crescimento populacional de 30%, e cujas características principais se encontram no anexo A. As densidades populacionais permitidas na expansão são três, 75 hab/ha, 50 hab/ha e 25 hab/ha e a combinação de pesos escolhida é a combinação 1, aquela que considera um peso igual para todos os componentes da função objetivo. Assim, e com base nos dados constantes no anexo A já referido, apresentam-se as Figuras 6.16, 6.17, 6.18, 6.19, 6.20, 6.21, 6.22 e 6.23 com as características físicas da área em estudo e os traçados das infraestruturas da cidade existente.

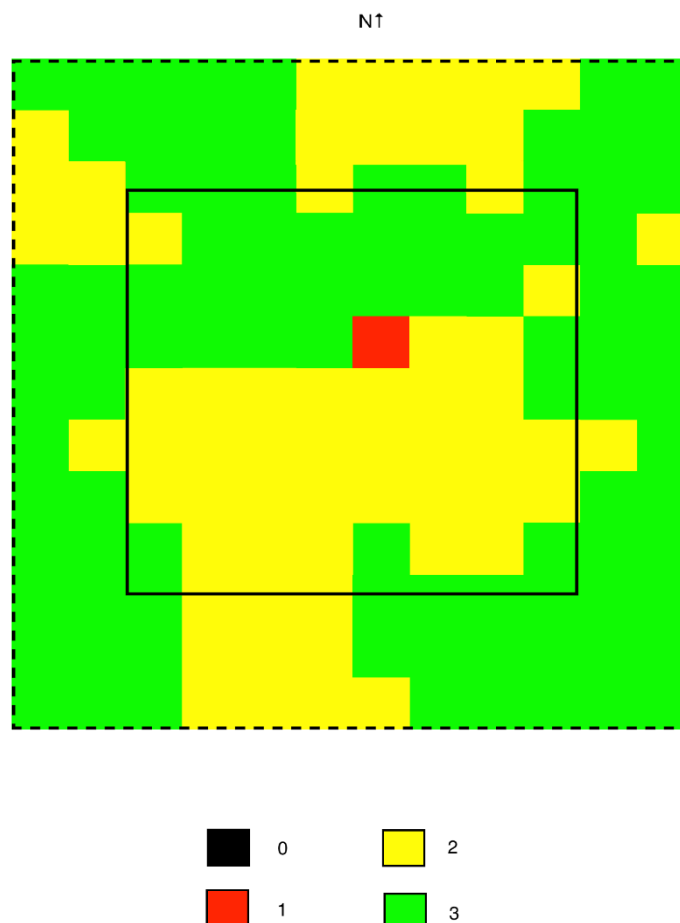


Figura 6.16 – Mapa representativo do Índice de Aptidão de acordo com a Tabela 6.2 (cidade existente e domínio de expansão).

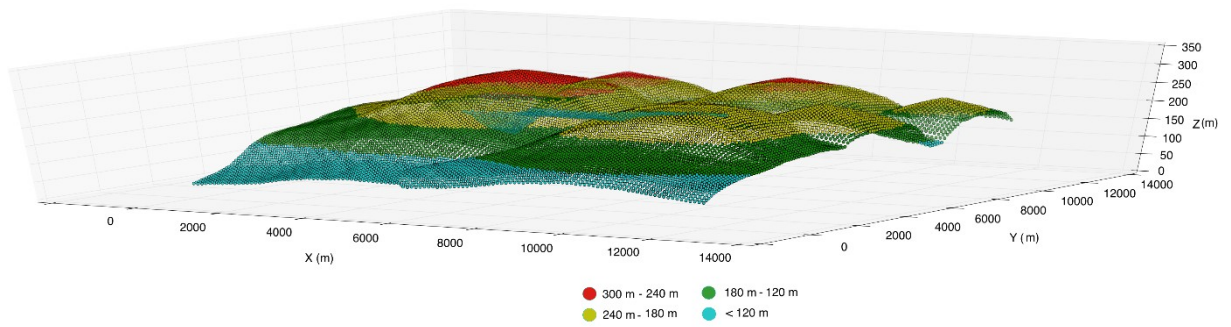


Figura 6.17- Topografia (cidade existente e domínio de expansão).

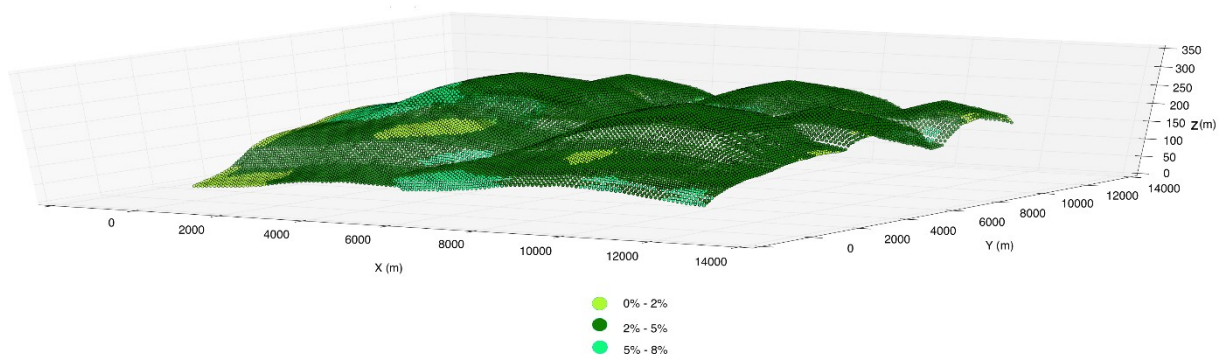


Figura 6.18 – Inclinação do terreno (cidade existente e domínio de expansão).

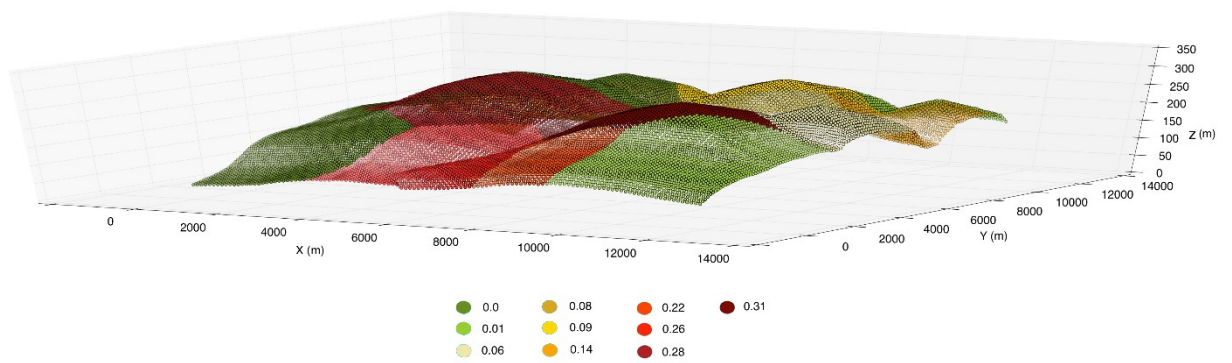


Figura 6.19 – Indicador da permeabilidade (cidade existente e domínio de expansão).

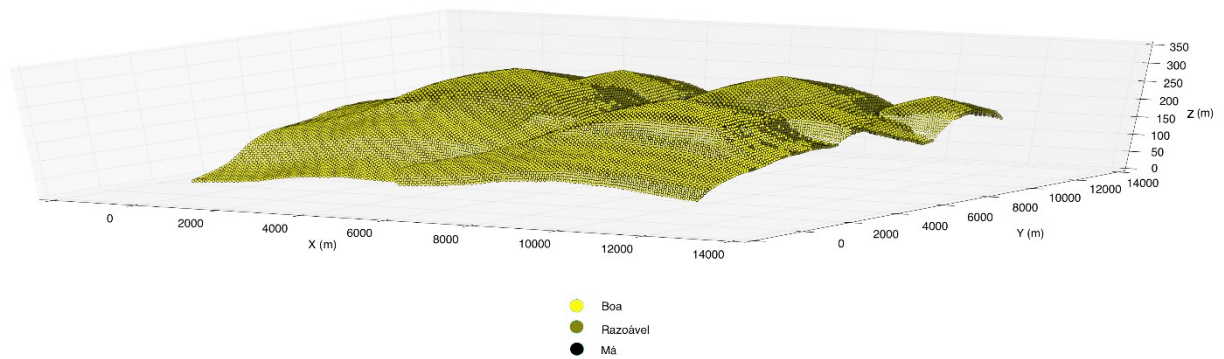


Figura 6.20 – Indicador da exposição solar (cidade existente e domínio de expansão).

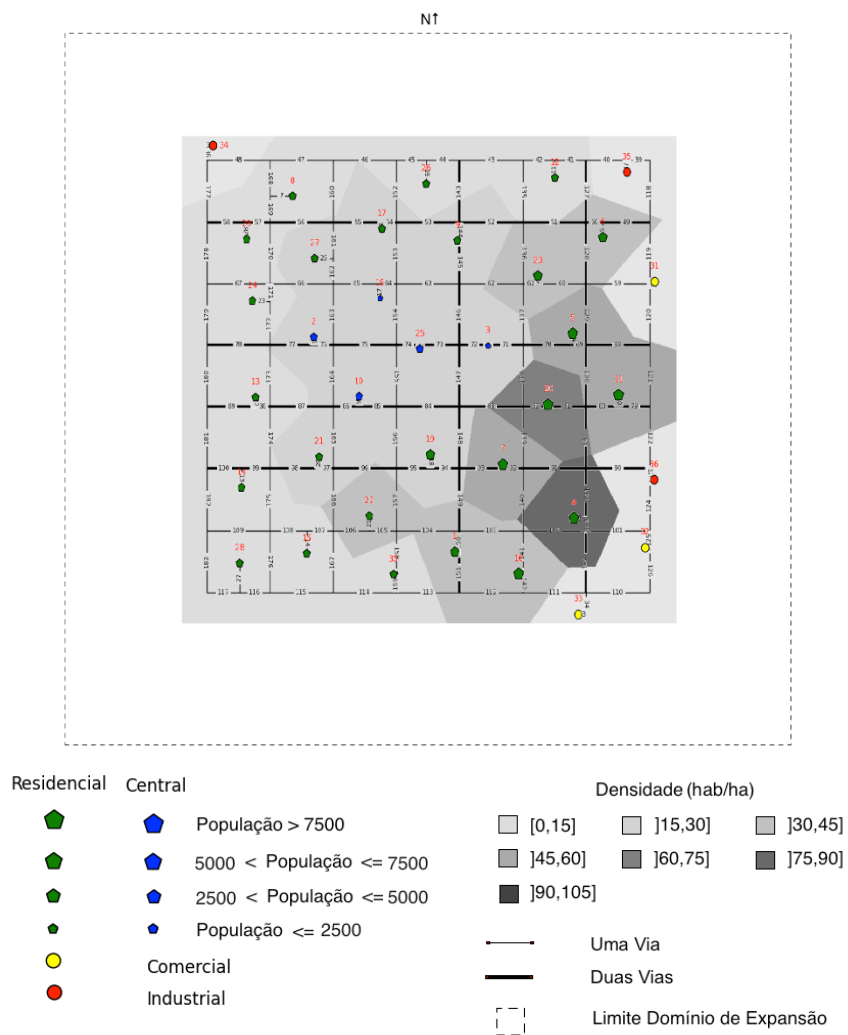


Figura 6.21 – Traçado da rede de transportes (cidade existente).

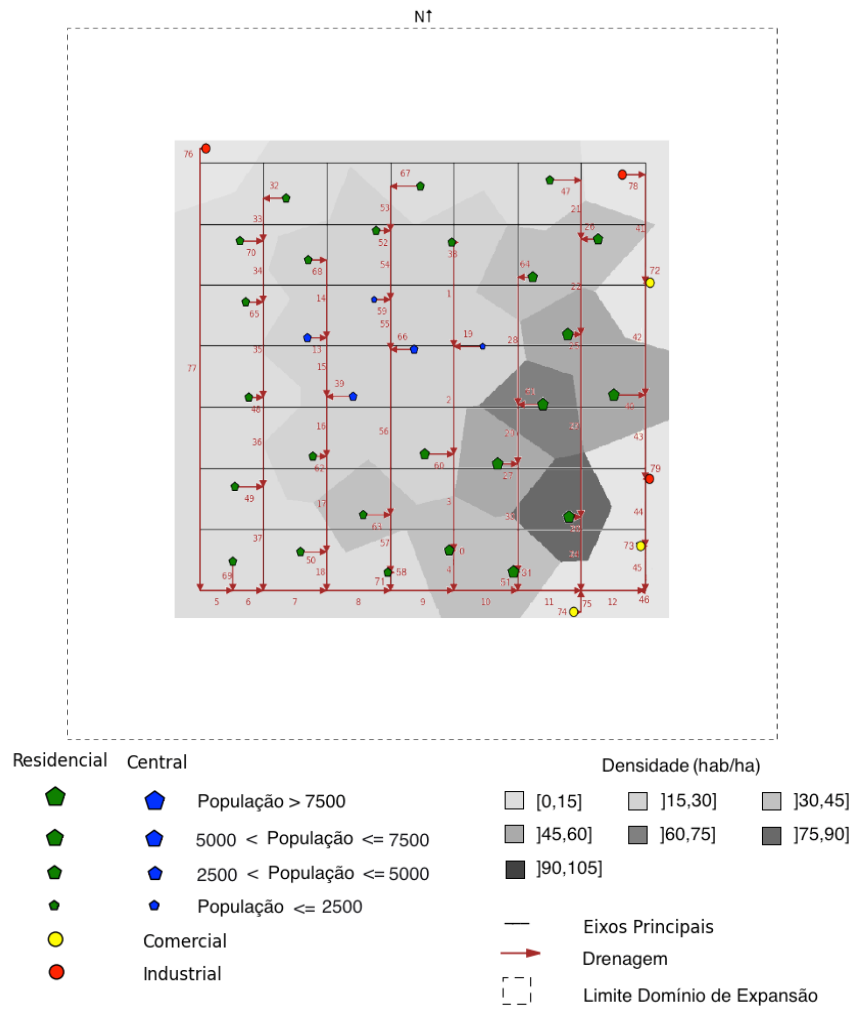


Figura 6.22 – Traçado da rede de drenagem de águas residuais (cidade existente).

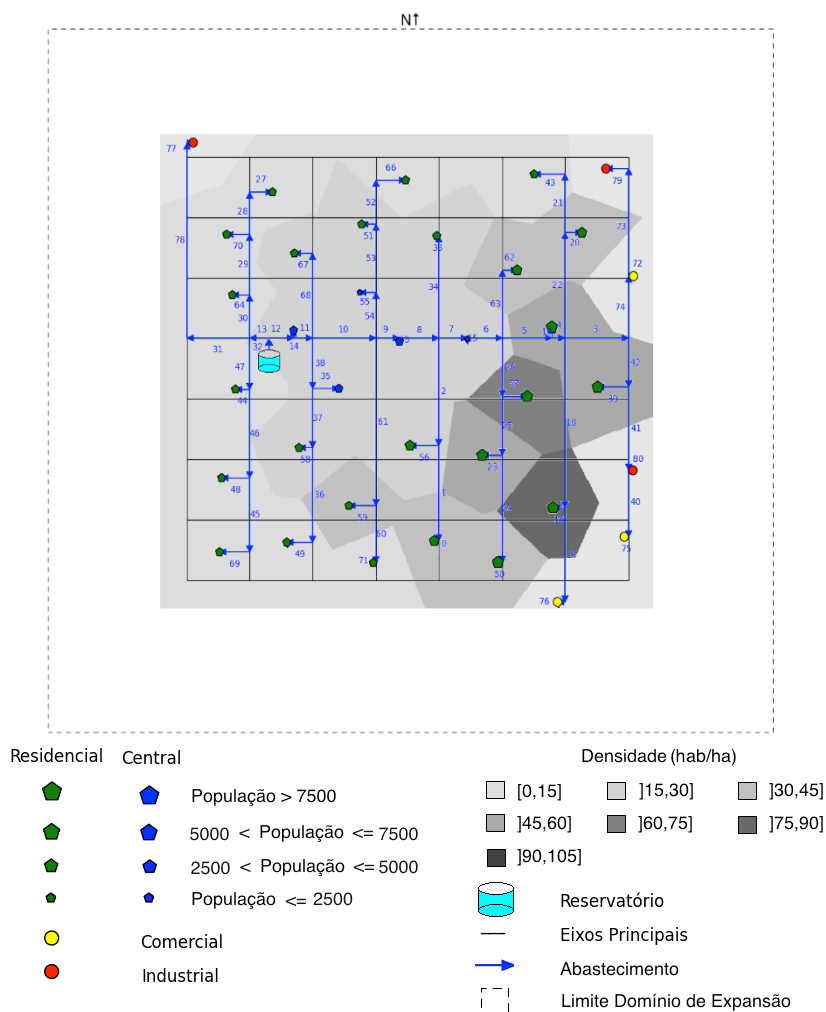


Figura 6.23 – Traçado da rede de abastecimento de água (cidade existente).

Nas condições descritas fizeram-se dez execuções do algoritmo cujos resultados estão representados nas Figuras 6.24, 6.25 e 6.26. No anexo B encontram-se dados adicionais e resultados relativos às soluções para as dez execuções.

É de referir que, apesar de se terem feito dez execuções do algoritmo, nas figuras que se seguem só se representam os resultados relativos a cinco, pois as restantes originam soluções idênticas, como pode ser consultado no referido anexo B.

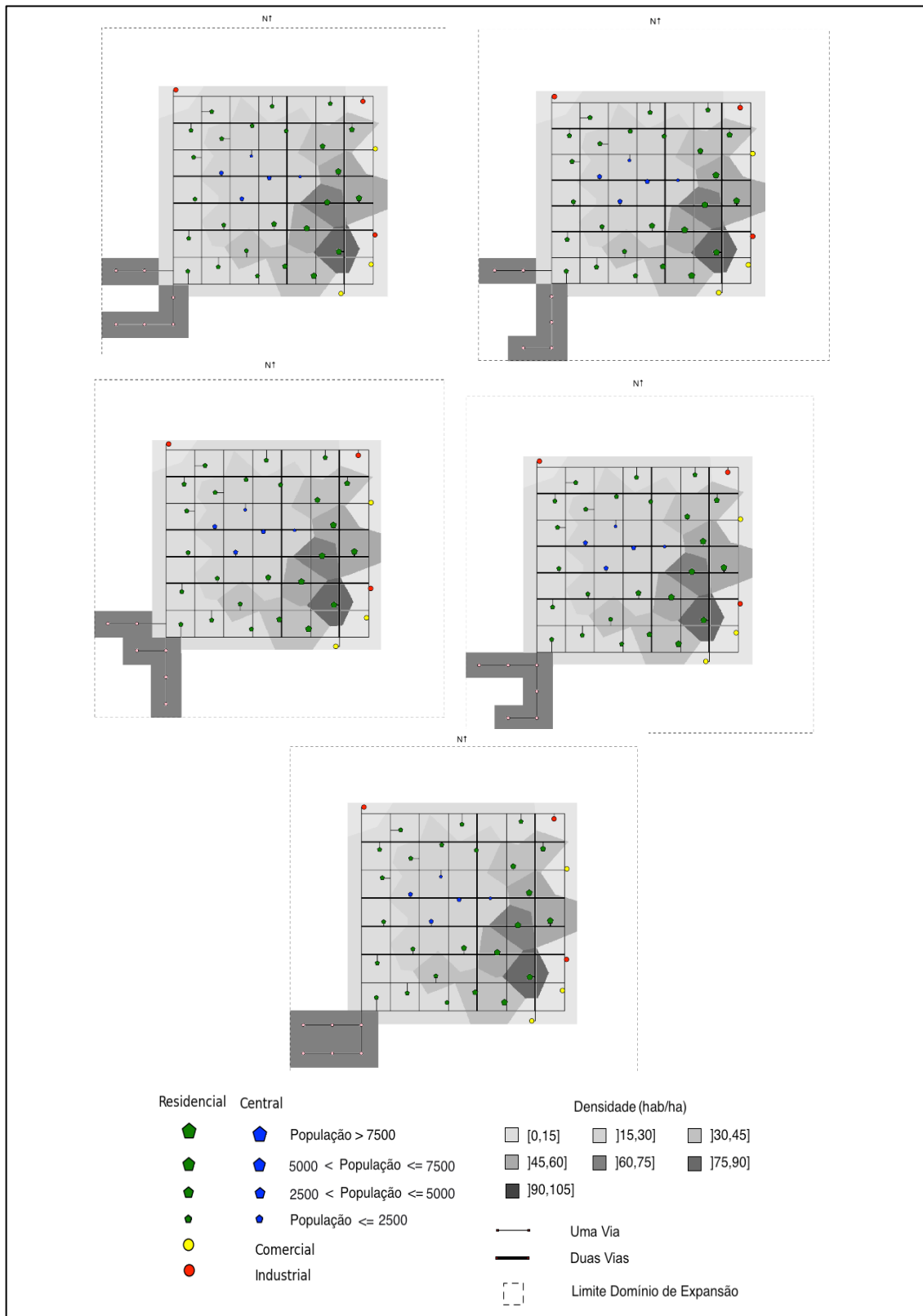


Figura 6.24 – Resultados das execuções do algoritmo para verificação da robustez do algoritmo – traçados da rede de transportes.

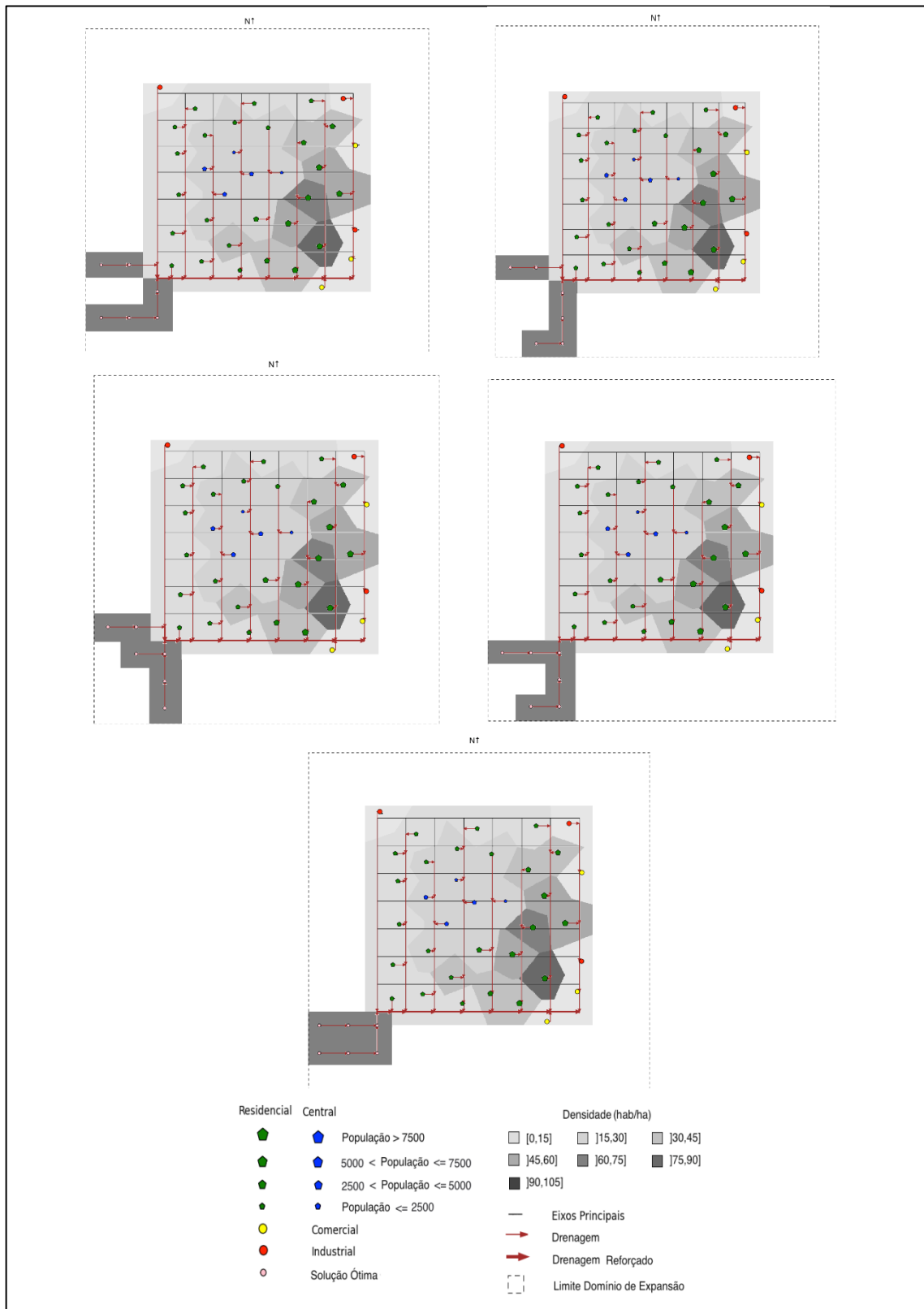


Figura 6.25 – Resultados das execuções do algoritmo para verificação da robustez do algoritmo- traçados da rede de drenagem de águas residuais.

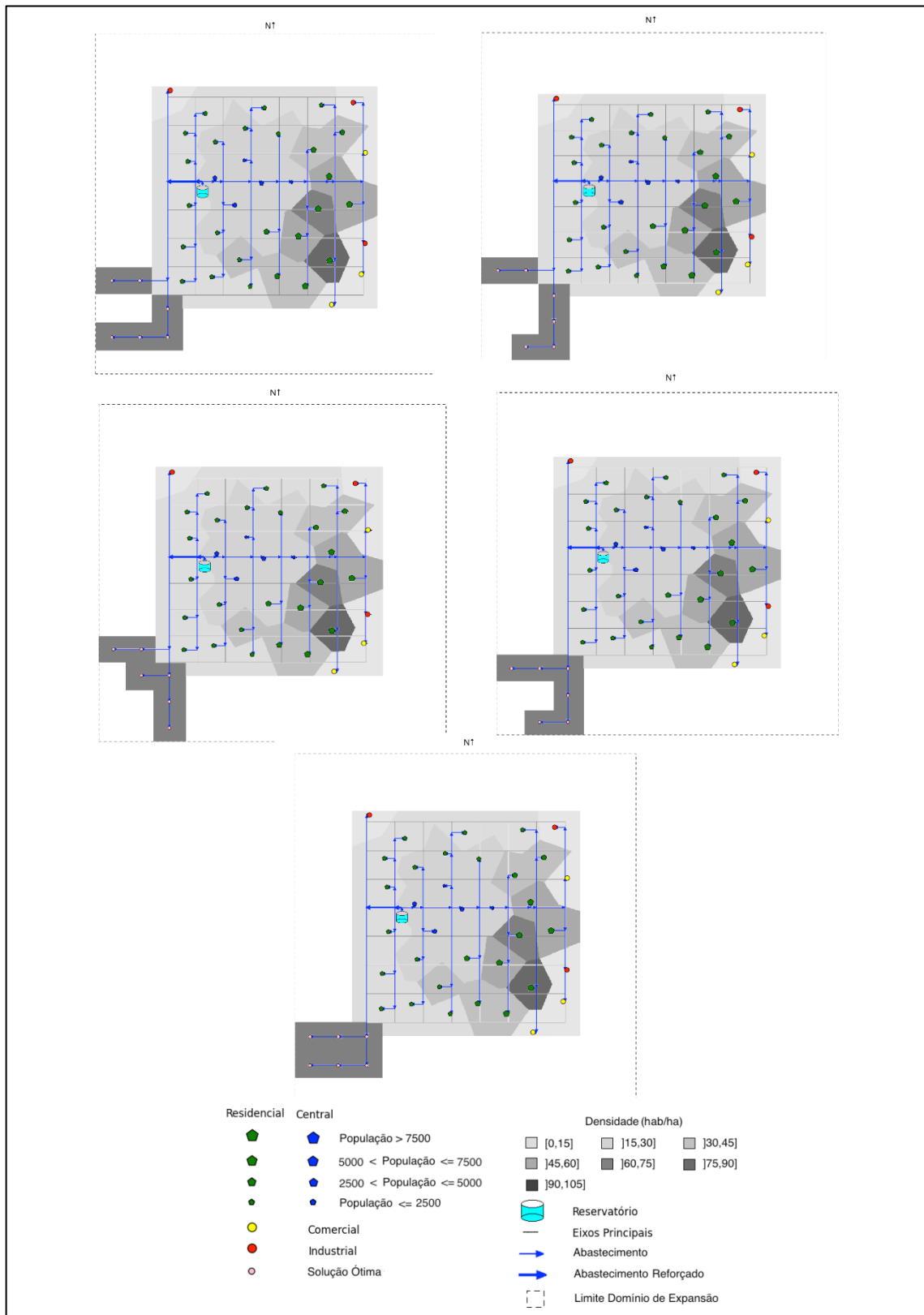


Figura 6.26 – Resultados das execuções do algoritmo para verificação da robustez do algoritmo - traçados da rede de abastecimento de água.

Apresentam-se na Tabela 6.9 os desvios das várias soluções em relação ao melhor valor encontrado para a função objetivo para as dez execuções do algoritmo.

Tabela 6.9 – Desvios dos valores da função objetivo relativos às dez execuções para verificação da robustez do algoritmo.

Execução	Função objetivo	Desvio	Tempo de execução (h)
1	0.785	0.64	26.10
2	0.786	0.77	17.24
3	0.791	1.41	24.01
4	0.785	0.64	22.60
5	0.786	0.77	15.10
6	0.780	0.00	13.24
7	0.780	0.00	20.48
8	0.780	0.00	13.10
9	0.789	1.15	11.79
10	0.785	0.64	26.65
média			19.03

Pela análise da Tabela 6.9, a robustez do algoritmo mostra-se desde logo evidente pela semelhança no valor da função objetivo obtido nas dez execuções. Calculando os desvios em relação ao mínimo valor encontrado para a função objetivo, verifica-se que aqueles valores quando não são nulos são muito pequenos.

Já se referiu que, sob determinadas condições, o algoritmo converge para uma solução ótima global, mas isso leva a tempos de execução impraticáveis. Os valores que resultaram da calibração do algoritmo, na Secção 6.3.3, pretendem fazer um equilíbrio entre uma solução de boa qualidade (se não ótima) e um tempo de execução razoável (19.03 h em termos médios de acordo com a Tabela 6.9).

Em cada execução, o algoritmo do Recozimento Simulado recorre a números aleatórios na definição da solução inicial, ou seja, cada execução do programa é inicializada partindo de

uma solução diferente. Recorre igualmente a números aleatórios na geração de soluções candidatas e ainda quando utiliza o critério de Metropolis.

Os aspetos descritos podem assim levar a que o algoritmo não chegue à mesma solução, No entanto, verifica-se pelas figuras anteriores que, como era de esperar, chega a soluções bastante semelhantes não só em termos de valor da função objetivo com também em termos da distribuição das novas áreas de expansão pelo domínio de expansão.

O número de áreas de expansão é constante de solução para solução e são localizadas sempre na mesma região do domínio de expansão sendo-lhes atribuída a densidade populacional máxima permitida, de acordo com o Índice de Aptidão que as caracteriza. A seguir apresentam-se as Figuras 6.27, 6.28 e 6.29 relativas à execução que originou a solução cujo valor da função objetivo é mínimo (consultar também o anexo A). A Tabela 6.10 apresenta a caracterização sumária das áreas de expansão relativas à solução de custo mínimo das dez execuções.

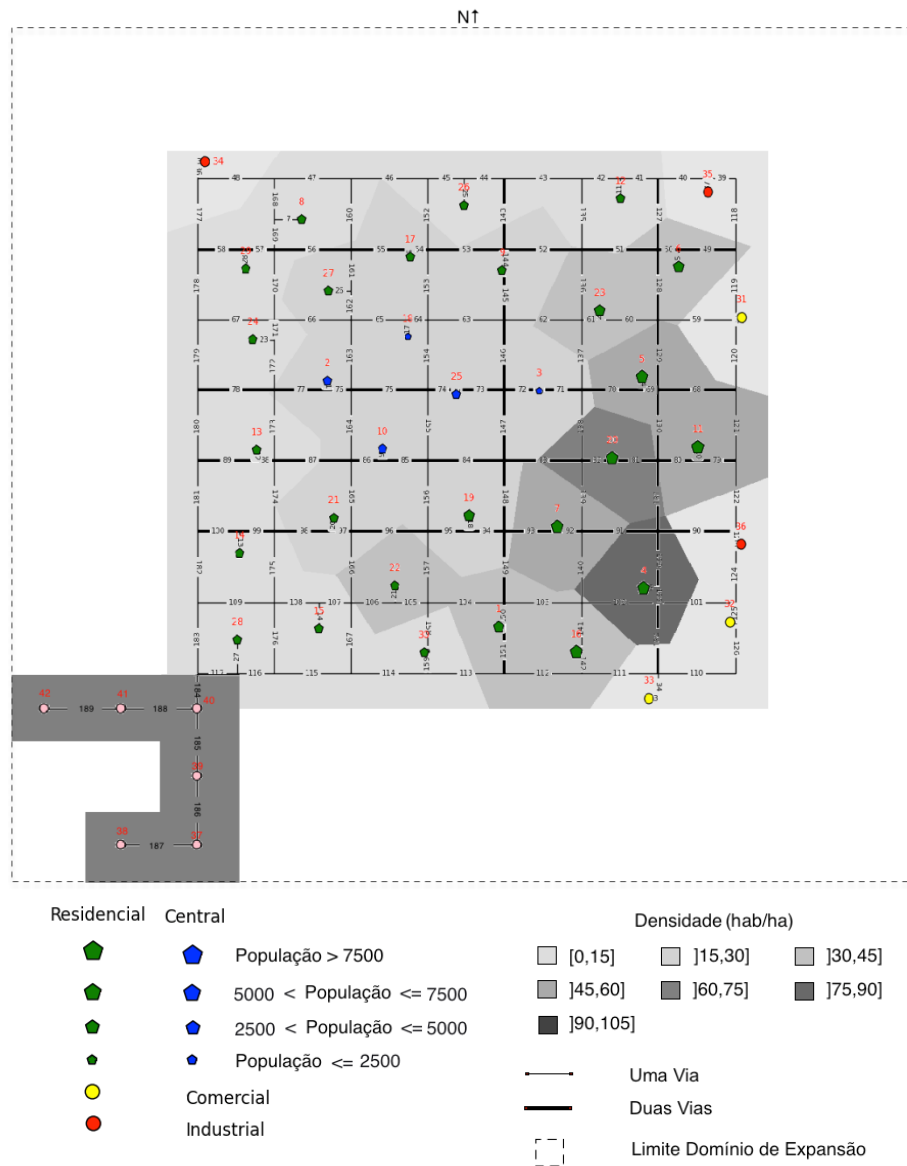


Figura 6.27 – Traçado da rede de transportes para a solução de custo mínimo das dez execuções.

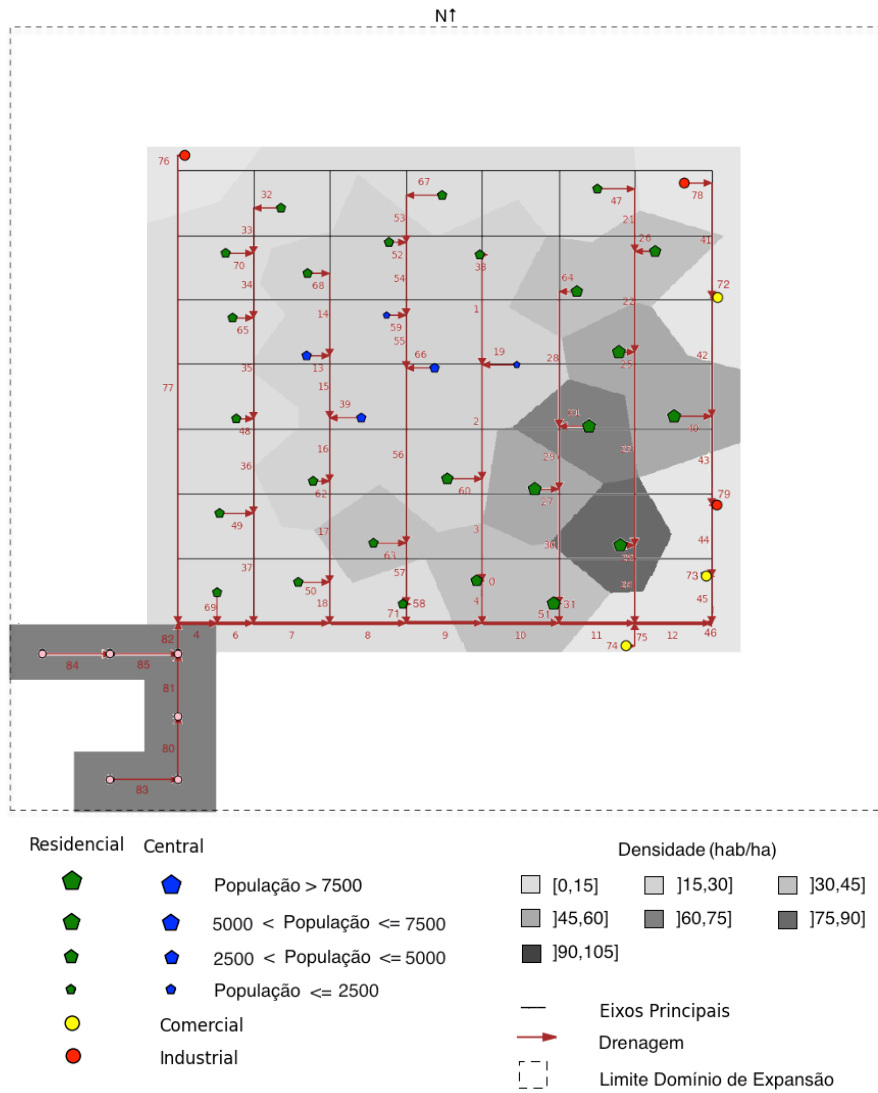


Figura 6.28 – Traçado da rede de drenagem para a solução de custo mínimo das dez execuções.

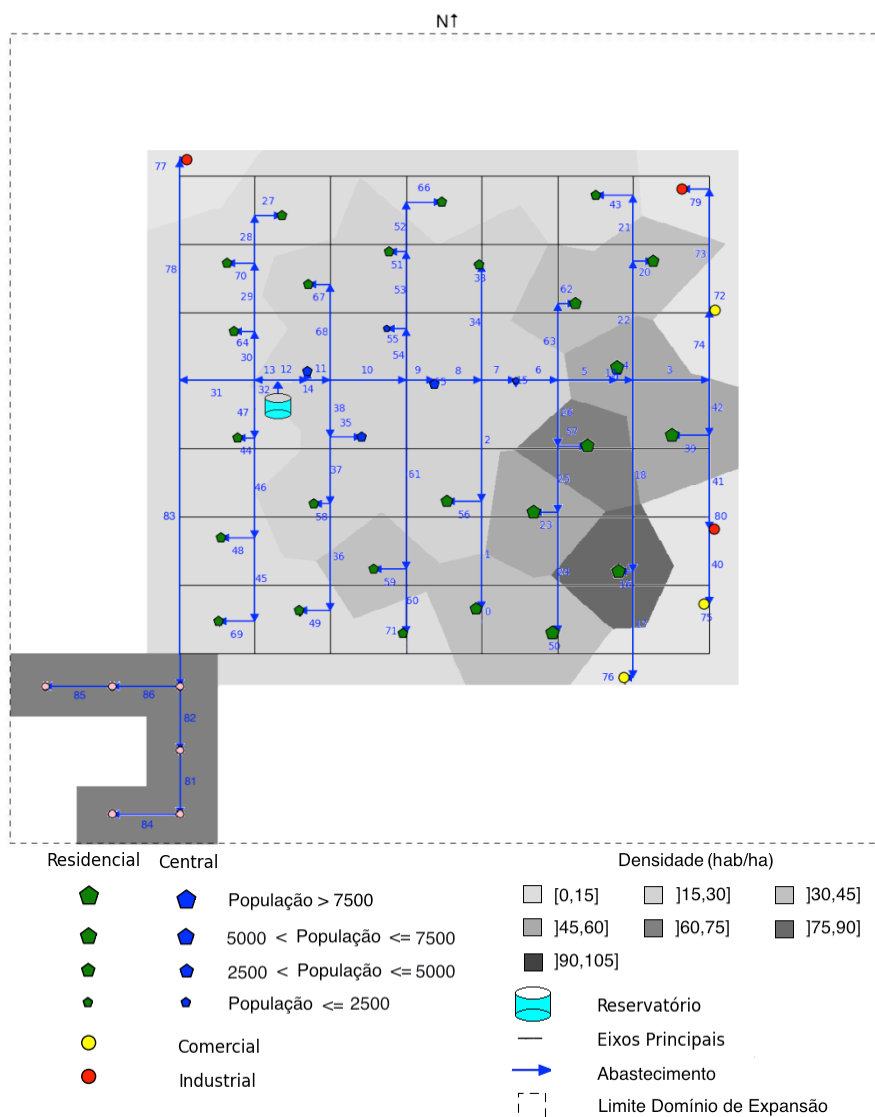


Figura 6.29 – Traçado da rede de abastecimento para a solução de custo mínimo das dez execuções.

Tabela 6.10 – Caracterização dos centróides novos na solução de custo mínimo das dez execuções.

ID	Avaliação do Índice de Aptidão				Densidade populacional hab/ha	População dos novos centróides
	Inclinação	Exposição Solar	Permeabilidade	Final		
37	ideal	boa	0	3	75	7500
38	fraca	boa	0	3	75	7500
39	ideal	boa	0	3	75	7500
40	ideal	boa	0	3	75	7500
41	ideal	boa	0	3	75	7500
42	ideal	boa	0	3	75	7500

Um estudo mais detalhado destas soluções será apresentado mais adiante.

6.3.5 Esforço Computacional

Nesta secção analisa-se a variação do tempo de execução do algoritmo em função das seguintes variáveis: crescimento populacional, dimensão da cidade e combinação dos pesos afetos à função objetivo.

Para tal, na Tabela 6.11 sintetizam-se os cenários analisados:

Tabela 6.11 – Cenários para avaliação do esforço computacional.

Cidade	Crescimento populacional	Combinação de pesos	Cenário
75000 habitantes	30%	Combinação 1	Cenário 1
150000 habitantes	20%	Combinação 1	Cenário 2
	30%	Combinação 1	Cenário 3
		Combinação 2	Cenário 4
		Combinação 3	Cenário 5
		Combinação 4	Cenário 6
	45%	Combinação 1	Cenário 7
300000 habitantes	30%	Combinação 1	Cenário 8

São analisadas três dimensões para a cidade cidade, uma cidade com 75000 habitantes, designada doravante por cidade pequena, outra com 150000 habitantes, considerada como cidade média (já utilizada para a avaliação da robustez do algoritmo) e outra com 300000 habitantes designada por cidade grande.

Como se verificou na secção anterior, na busca da solução óptima, existe a tendência para distribuir a densidade populacional máxima permitida em cada zona de expansão. Nas análises que se seguem, consideram-se para os valores das densidades populacionais apenas os dois valores mais baixos, 50 hab/ha e 25 hab/ha.

As Figuras 6.30 à 6.37 correspondem às soluções de custo mínimo de cada cenário (mais dados e resultados relativos a cada cenário encontram-se no anexo D):

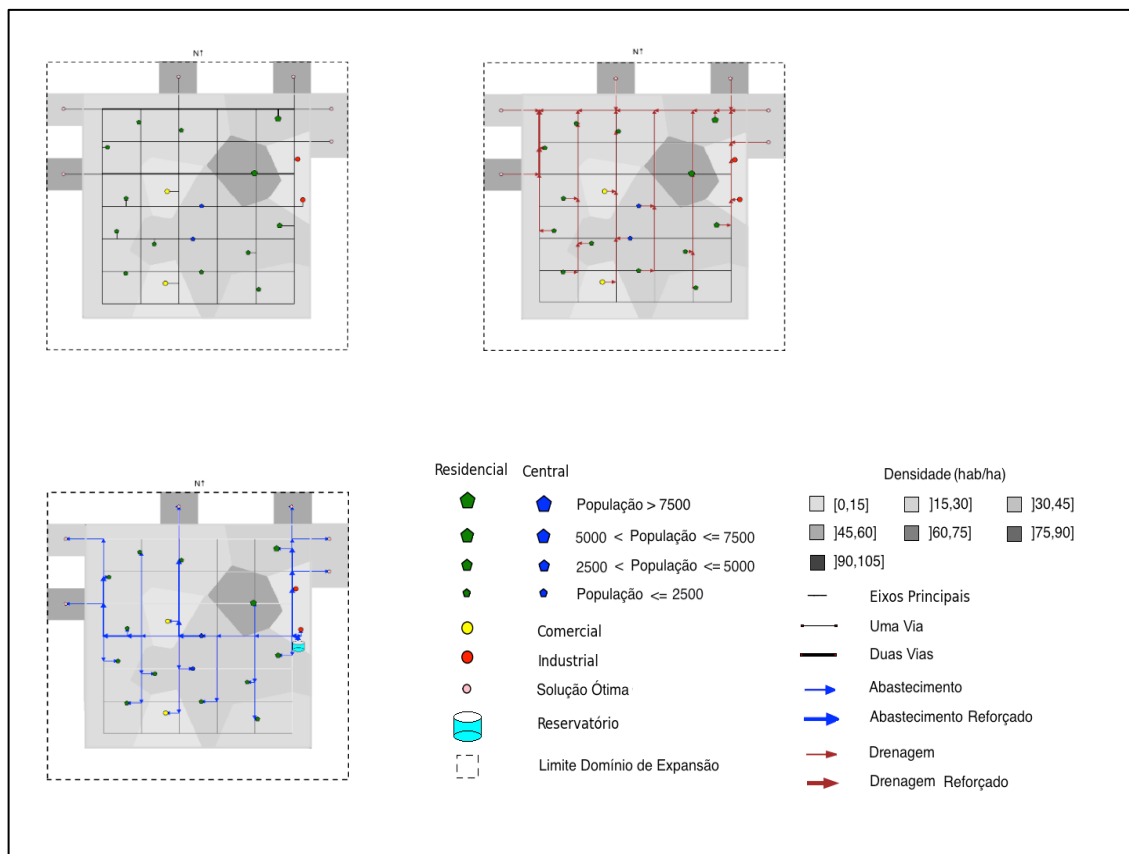


Figura 6.30 – Cenário 1, solução de custo mínimo - redes de transportes, de drenagem de águas residuais e abastecimento de água.

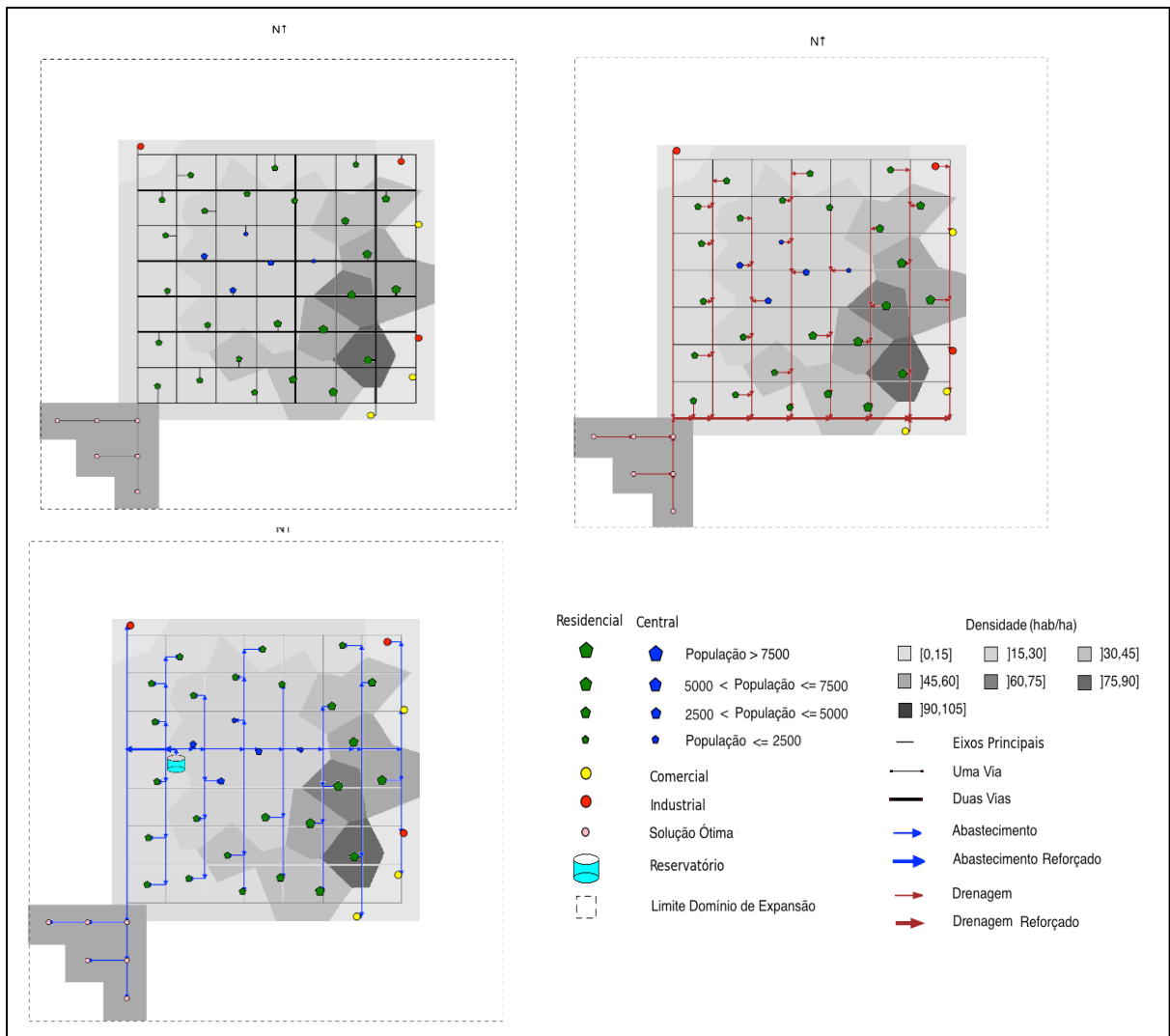


Figura 6.31 – Cenário 2, solução de custo mínimo - redes de transportes, de drenagem de águas residuais e abastecimento de água.

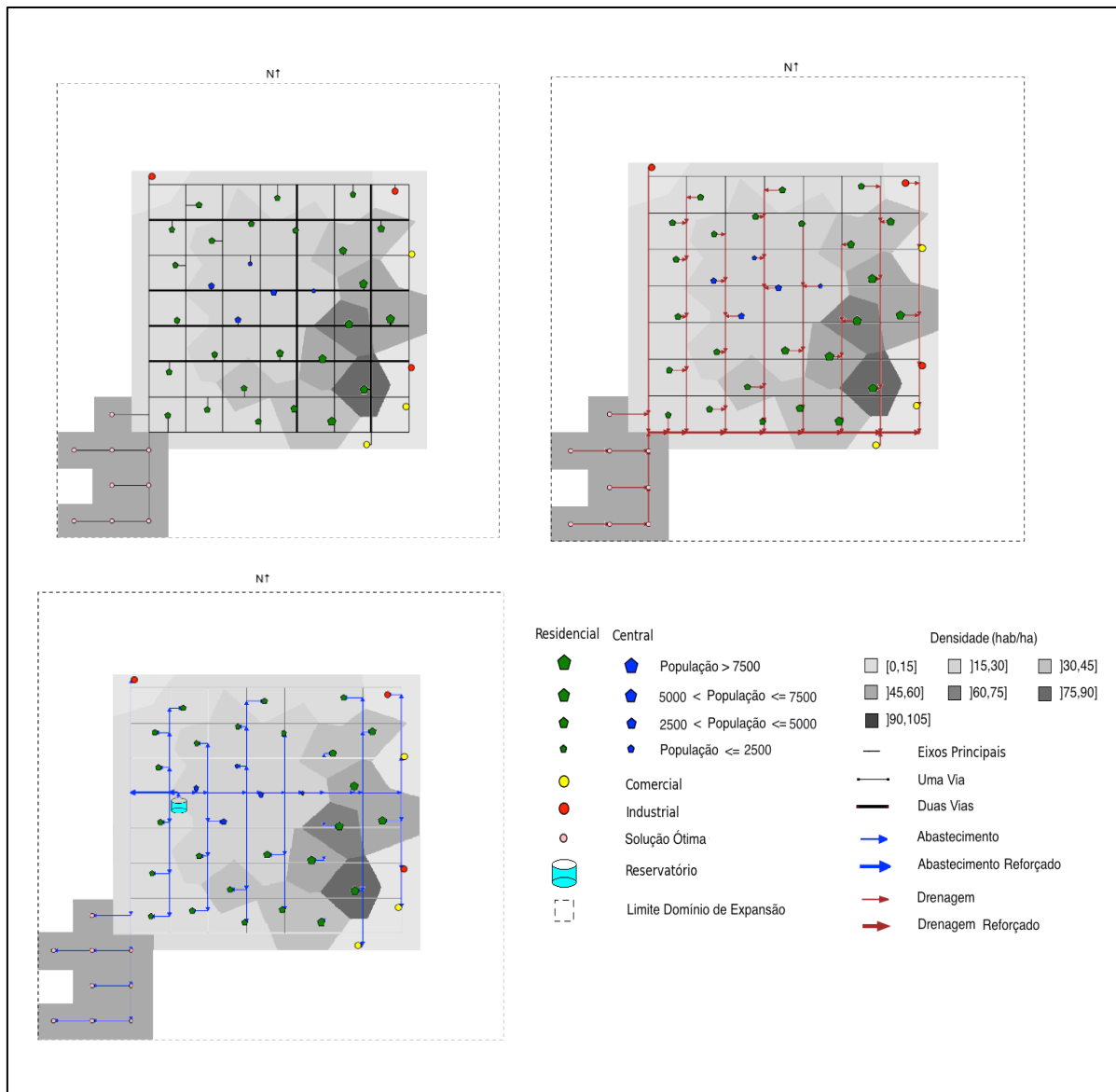


Figura 6.32 – Cenário 3, solução de custo mínimo - redes de transportes, de drenagem de águas residuais e abastecimento de água.

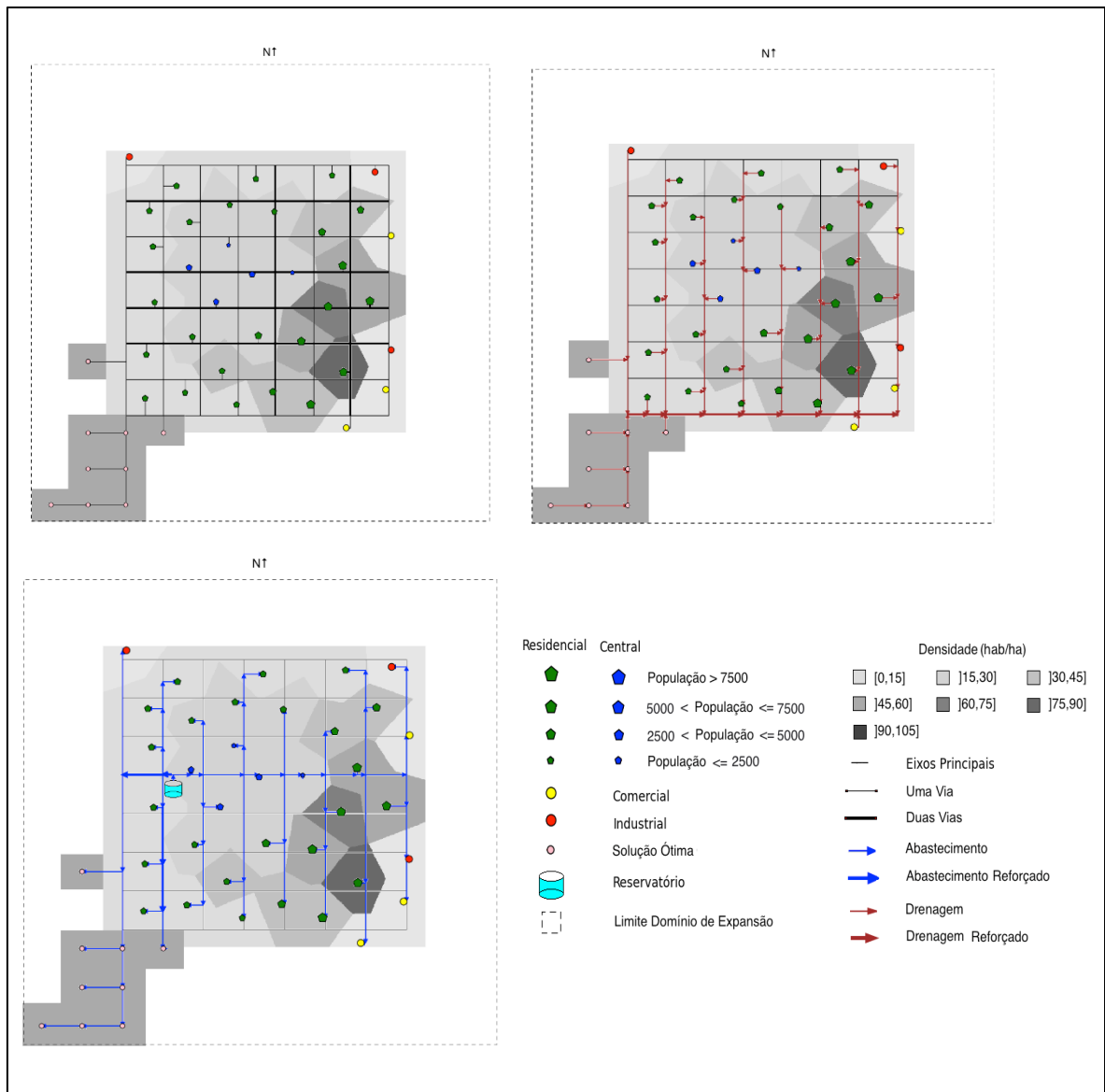


Figura 6.33 – Cenário 4, solução de custo mínimo - redes de transportes, de drenagem de águas residuais e abastecimento de água.

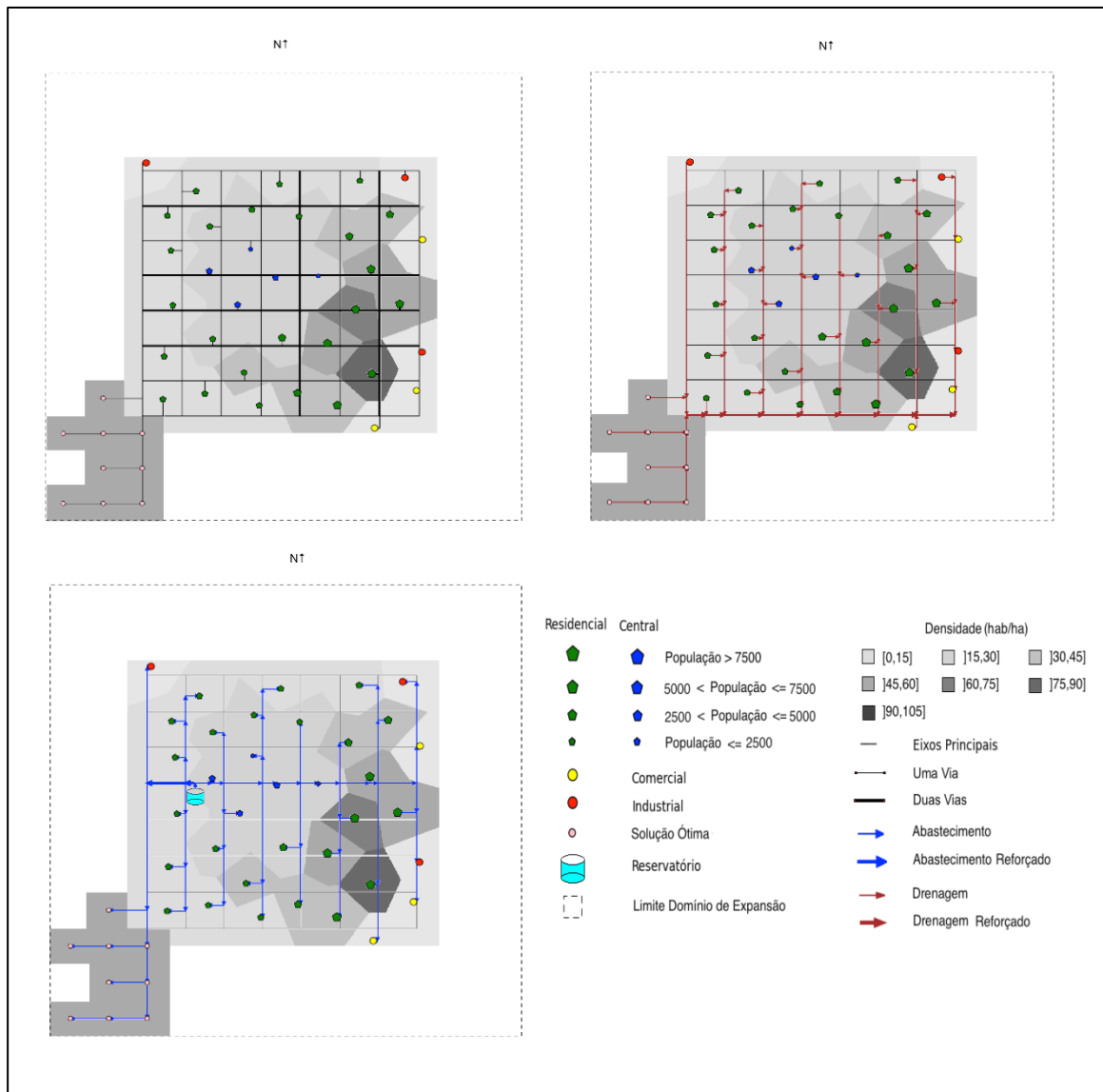


Figura 6.34 – Cenário 5, solução de custo mínimo - redes de transportes, de drenagem de águas residuais e abastecimento de água.

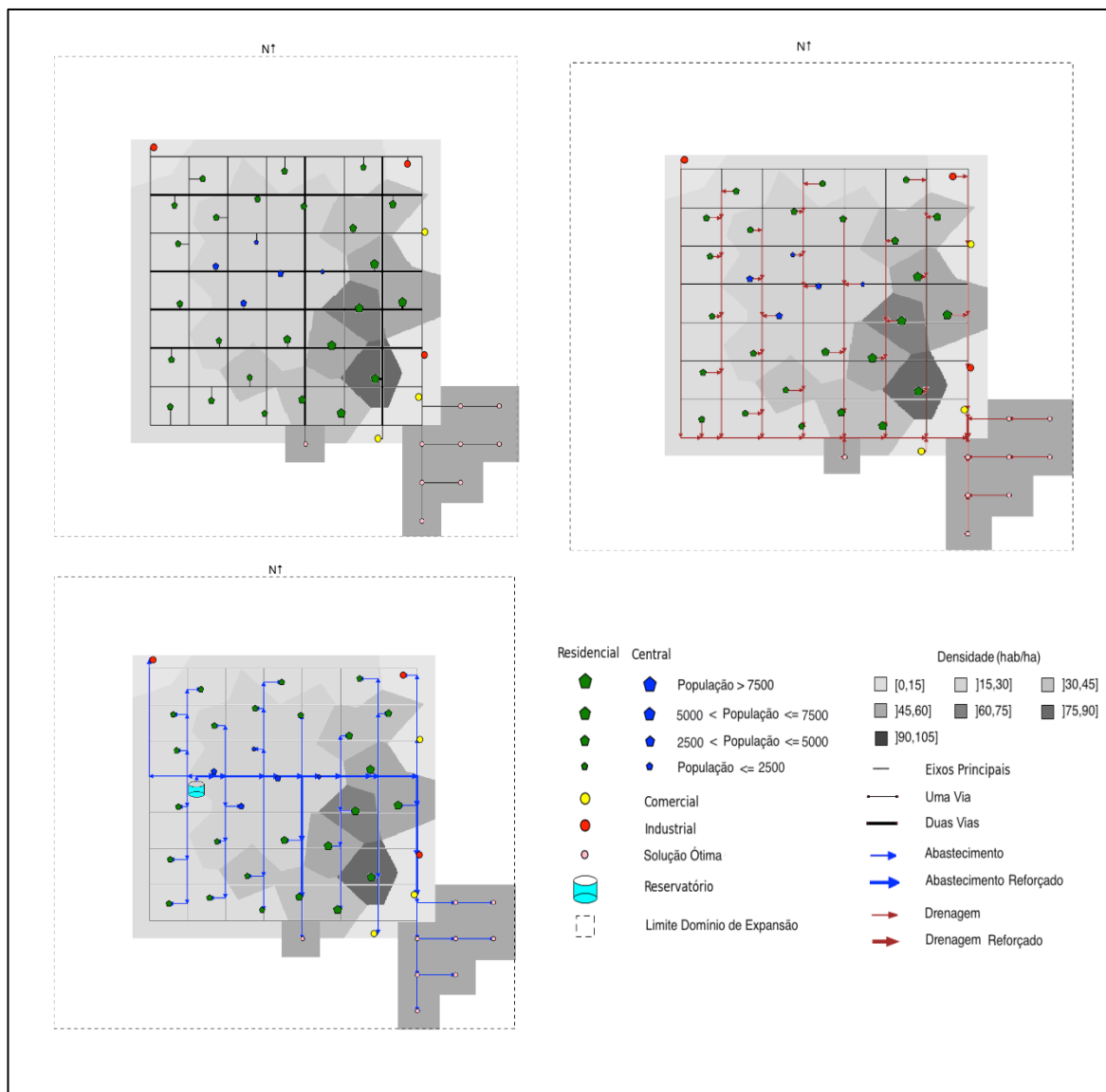


Figura 6.35 – Cenário 6, solução de custo mínimo - redes de transportes, de drenagem de águas residuais e abastecimento de água.

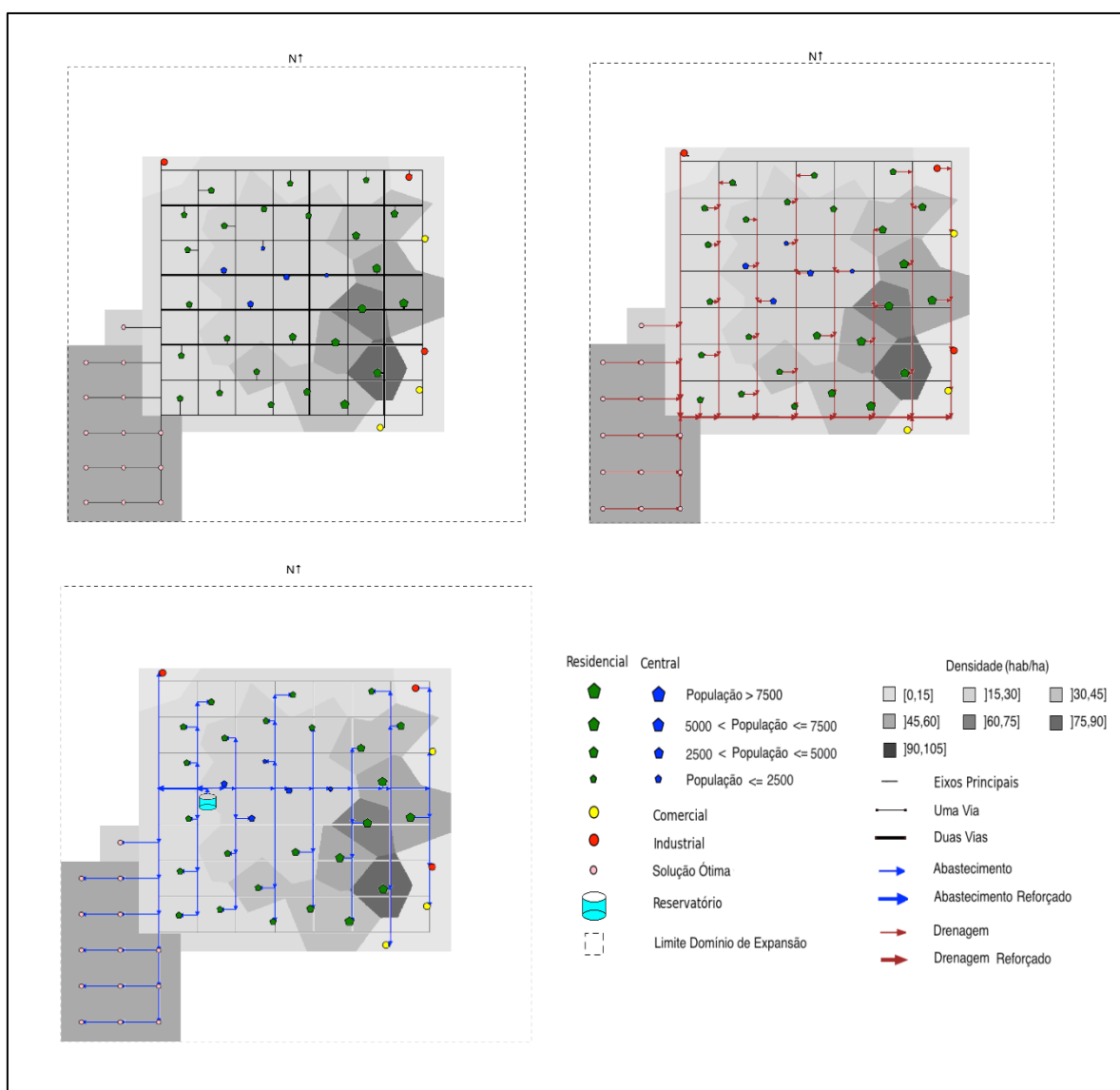


Figura 6.36 – Cenário 7, solução de custo mínimo - redes de transportes, de drenagem de águas residuais e abastecimento de água.

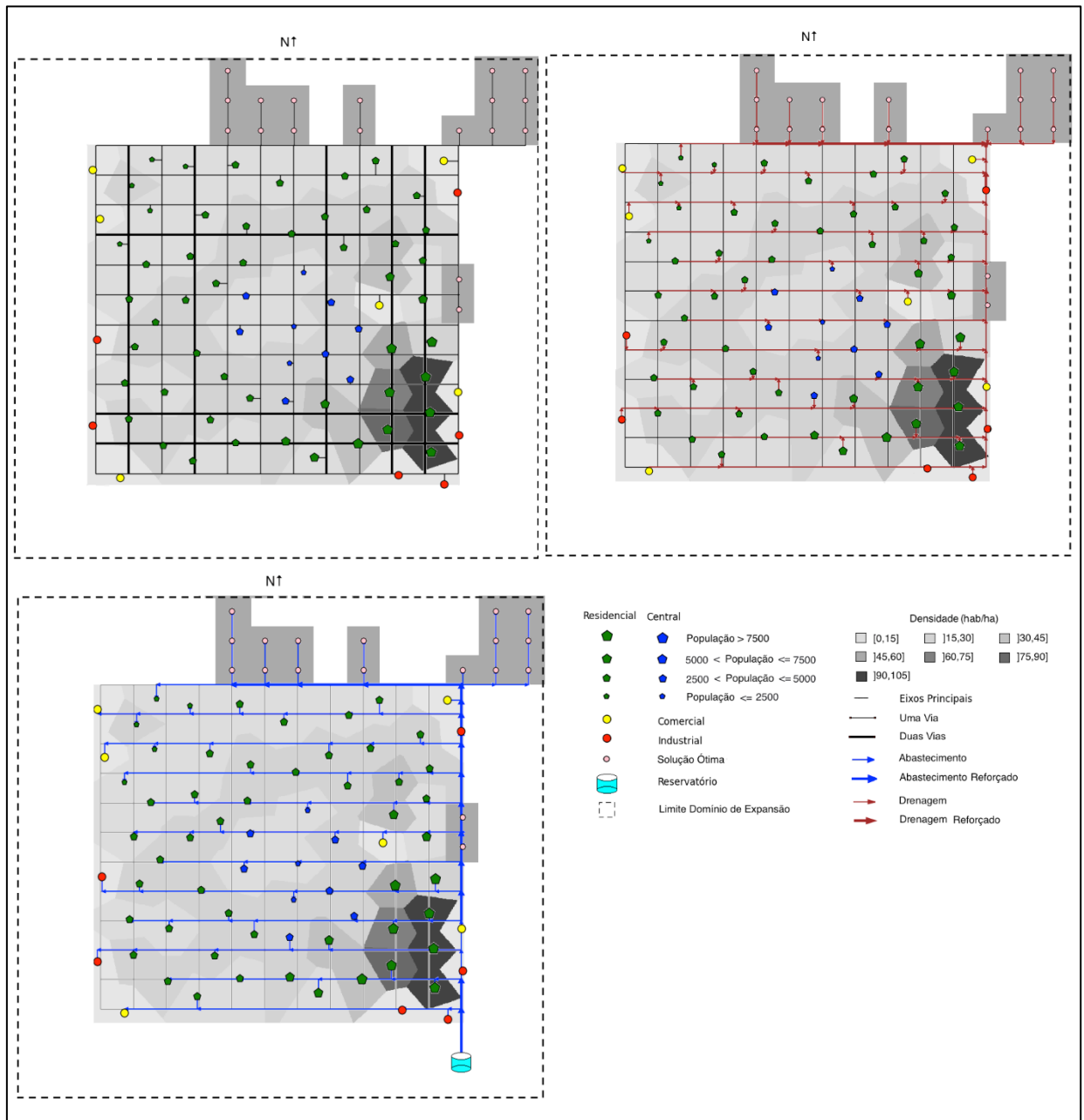


Figura 6.37 – Cenário 8, solução de custo mínimo - redes de transportes, de drenagem de águas residuais e abastecimento de água.

Para a análise da variação do esforço computacional com a variação do crescimento populacional analisam-se os cenários 2, 3 e 7, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Avaliação do esforço computacional com a variação do crescimento populacional.

Cidade	Crescimento populacional	Combinação de pesos	Cenário	Função objetivo	Tempo de execução (h)
150000 habitantes	20%	Combinação 1	Cenário 2	0.502	25.11
150000 habitantes	30%	Combinação 1	Cenário 3	0.733	29.25
150000 habitantes	45%	Combinação 1	Cenário 7	1.107	38.50

De referir que, na Tabela 6.12 e seguintes, o tempo apresentado é a média das execuções realizadas para cada cenário. Relativamente à função objetivo é apresentado o custo mínimo encontrado para cada cenário, uma vez que, como já se demonstrou na secção anterior, este apresenta desvios muito pequenos de execução para execução.

Por observação da Tabela 6.12, e como seria de esperar, o valor da função objetivo da solução final aumenta com o crescimento populacional considerado. Uma vez que as densidades populacionais permitidas são iguais para todos os cenários considerados nesta secção, como já foi referido, para um aumento superior da população têm de ser previstas mais áreas de expansão. Isto leva a infraestruturas maiores quer em termos da cidade existente (pelo seu redimensionamento), quer em termos da sua ampliação, incrementando o respetivo valor da função objetivo (consultar Tabela 6.13).

Tabela 6.13 – Resumo dos resultados relativos às soluções de custo mínimo dos cenários em análise.

Crescimento populacional	Centróides cidade existente	Novas áreas de expansão	Comprimento rede nova e reforçada (m)			$Q \times H$ (m ⁴ /s)		Tempo gasto na rede de transportes (h)
			Transporte	Abastecimento	Drenagem	Abast.	Dren.	
20%	36	6	12322.00	14784.92	16463.93	0	24.23	53548656.27
30%	36	9	18322.00	18015.30	21451.32	0	41.28	87636114.76
45%	36	14	28322.00	24007.38	32940.63	0	53.77	154311298.70

Por outro lado, também o tempo de execução aumenta, pois mais áreas de expansão e maiores infraestruturas levam a que se despenda mais tempo na escolha da solução inicial, na geração das soluções candidatas e, sobretudo, no redimensionamento das redes existentes e dimensionamento das redes novas.

No entanto, o aumento do tempo de execução como consequência do crescimento populacional sofrido pela cidade, pode ser considerado pouco significativo quando comparado com a análise que se segue, como se observará.

Para análise da variação do esforço computacional com o aumento da dimensão da cidade foram analisados os cenários 1, 3 e 8, e os resultados apresentados na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 – Avaliação do esforço computacional com a variação da dimensão da cidade.

Cidade	Crescimento populacional	Combinação de Pesos	Cenário	Função objetivo	Tempo de execução (h)
75000 habitantes	30%	Combinação 1	Cenário 1	0.221	1.41
150000 habitantes	30%	Combinação 1	Cenário 3	0.612	23.03
300000 habitantes	30%	Combinação 1	Cenário 8	0.907	231.83

Constata-se que, mais uma vez como era esperado, há um aumento do valor da função objetivo, com o aumento de dimensão da cidade. Numa cidade de maior dimensão tanto o número de centróides existentes como o número de novas áreas de expansão são obviamente maiores. Isto leva ao aumento de tudo o que isso envolve em termos, não só das infraestruturas da cidade existente, como também das infraestruturas a construir (consultar Tabela 6.15), razões também já apontadas na análise anterior.

Tabela 6.15 – Resumo dos resultados relativos às melhores soluções para os cenários em análise.

Cidade	Centróides cidade existente	Novas áreas de expansão	Comprimento rede nova (m)			Tempo gasto na rede de transportes (h)
			Transporte	Abastecimento	Drenagem	
Pequena	19	6	12438.00	8127.70	6972.01	6607722.82
Média	36	9	18322.00	12508.78	8502.56	87636114.76
Grande	72	16	31064.00	15542.32	15554.32	147123394.25

Na Tabela 6.15 não se incluiu a parcela $Q \times H$ nem os valores relativos ao comprimento de rede reforçada porque, como cada cenário trata uma cidade diferente, aqueles valores não são comparáveis nesta análise.

Relativamente ao tempo de resolução, verifica-se também um aumento à medida que a cidade considerada é maior sendo as razões apontadas anteriormente válidas nesta análise (neste caso aumentam não só as áreas necessárias para a expansão como também o número de centróides na cidade existente).

No entanto, verifica-se que aquele aumento agora é bastante significativo. De facto, o aumento da dimensão da cidade tem maior impacto no tempo de resolução do que o crescimento populacional considerado na análise anterior. Podem ser apontadas algumas razões para esta variação. O programa computacional utilizado inclui diversos algoritmos que

são muito sensíveis ao aumento da dimensão das redes e ao número de vezes que são chamados pelo algoritmo principal. Por exemplo, o algoritmo de Dijkstra é utilizado para calcular os caminhos mais curtos aquando da verificação das pressões na rede de abastecimento. O tempo de execução deste algoritmo é da ordem $O([AR+AN]\log AN)$, considerando que AN é o número de todos os nós da rede de abastecimento e AR representa o número de arcos constituintes dessa rede.

O algoritmo de Dijkstra é também utilizado aquando da aplicação do Método Iterativo para o cálculo do tráfego na rede de transportes. Assim, o tempo de execução gasto aquando da aplicação daquele método é da ordem $O(i \times (CN-1)!([TR+TN]\log TN))$ considerando que CN é o número de centróides, TN é o número de nós da rede de transportes, TR é o número de arcos da rede de transportes e i é o número de iterações necessário para se atingir o equilíbrio na rede relativo ao tempo de viagem.

Outra razão que pode ser apontada para o aumento do tempo de execução é a seguinte: com o aumento do domínio de expansão e, conseqüentemente, do número de possibilidades de localização das novas áreas de expansão, aumenta o conjunto de soluções possíveis para o problema. Desta forma o valor de n_2 , número de patamares de temperatura consecutivos em que não há melhoramento do custo ótimo ou do custo médio, não é tão facilmente atingido como no caso de uma cidade de menor dimensão, com um domínio de expansão menor.

Para analisar a variação do esforço computacional com as várias combinações de pesos afetos à função objetivo, consideraram-se os cenários 3, 4, 5 e 6 e os resultados representados na Tabela 6.16.

Tabela 6.16 – Avaliação do esforço computacional com a variação da combinação de pesos

Cidade	Crescimento populacional	Combinação de pesos	Cenário	Função objetivo	Tempo de execução (h)
150000 habitantes	30%	Combinação 1	Cenário 3	0.90	23.03
150000 habitantes	30%	Combinação 2	Cenário 4	0.97	27.93
150000 habitantes	30%	Combinação 3	Cenário 5	0.91	27.00
150000 habitantes	30%	Combinação 4	Cenário 6	0.74	30.62

Nesta análise não foi detectado qualquer padrão de variação pelo que se pode concluir que, em termos de esforço computacional, a alteração na combinação de pesos da função objetivo não é relevante. No entanto, no capítulo seguinte é apresentada uma análise mais detalhada das soluções obtidas com diferentes combinações de pesos de acordo com alguns indicadores.

6.4 Análise de Resultados

Na secção anterior foram traçados vários cenários com vista às análises pretendidas.

Foram obtidas soluções correspondentes aos cenários delineados que são agora analisadas e interpretadas com mais detalhe.

Estas análises são realizadas com base num conjunto de indicadores, descritos ao longo da exposição e que se entendem pertinentes na ótica da expansão das infraestruturas de uma cidade.

Um primeiro aspeto que será considerado relaciona-se com o número de áreas previstas para a expansão e a sua localização. Pretende-se aqui analisar de que forma cresce a cidade, isto é, como são escolhidas as novas áreas de expansão, se têm sempre a mesma tendência de localização independentemente do crescimento da cidade ou se são escolhidas localizações diferentes em função desse crescimento. Por outro lado, com esta análise pretende-se igualmente aferir, aquando da localização das novas áreas de expansão, se se prefere escolher áreas com um elevado Índice de Aptidão atribuindo-lhes as densidades populacionais máximas permitidas ou, por alguma razão, se se prefere escolher áreas com densidades mais baixas e diversificadas.

Outro aspeto que se aborda nesta secção diz respeito à natureza multiobjetivo do problema. Ao fazer a escolha das novas áreas de expansão, o algoritmo tem simultaneamente de minimizar os componentes contabilizados na função objetivo relativos às três infraestruturas em análise. Como se comporta o algoritmo no encontro desta meta? Dando prevalência a um dos componentes qual o impacto nos restantes?

Assim, para responder a estas e a outras questões nas análises mencionadas são utilizados os indicadores como sejam o número de novas áreas de expansão, densidades populacionais atribuídas, características das infraestruturas após expansão como sejam os comprimentos de rede nova, de rede reforçada e tempo de viagem na rede de transportes (alguns destes indicadores já foram utilizados em análises anteriores).

As primeiras soluções analisadas dizem respeito, mais uma vez, à cidade de dimensão média apresentada na Secção 6.3.4 e consideram para as densidades populacionais permitidas nas áreas de expansão os dois valores já referidos, 50 hab/ha e 25 hab/ha. A combinação de pesos que afeta a função objetivo é a combinação 1. O que varia de solução para solução é o crescimento populacional previsto para a cidade (Figura 6.38).

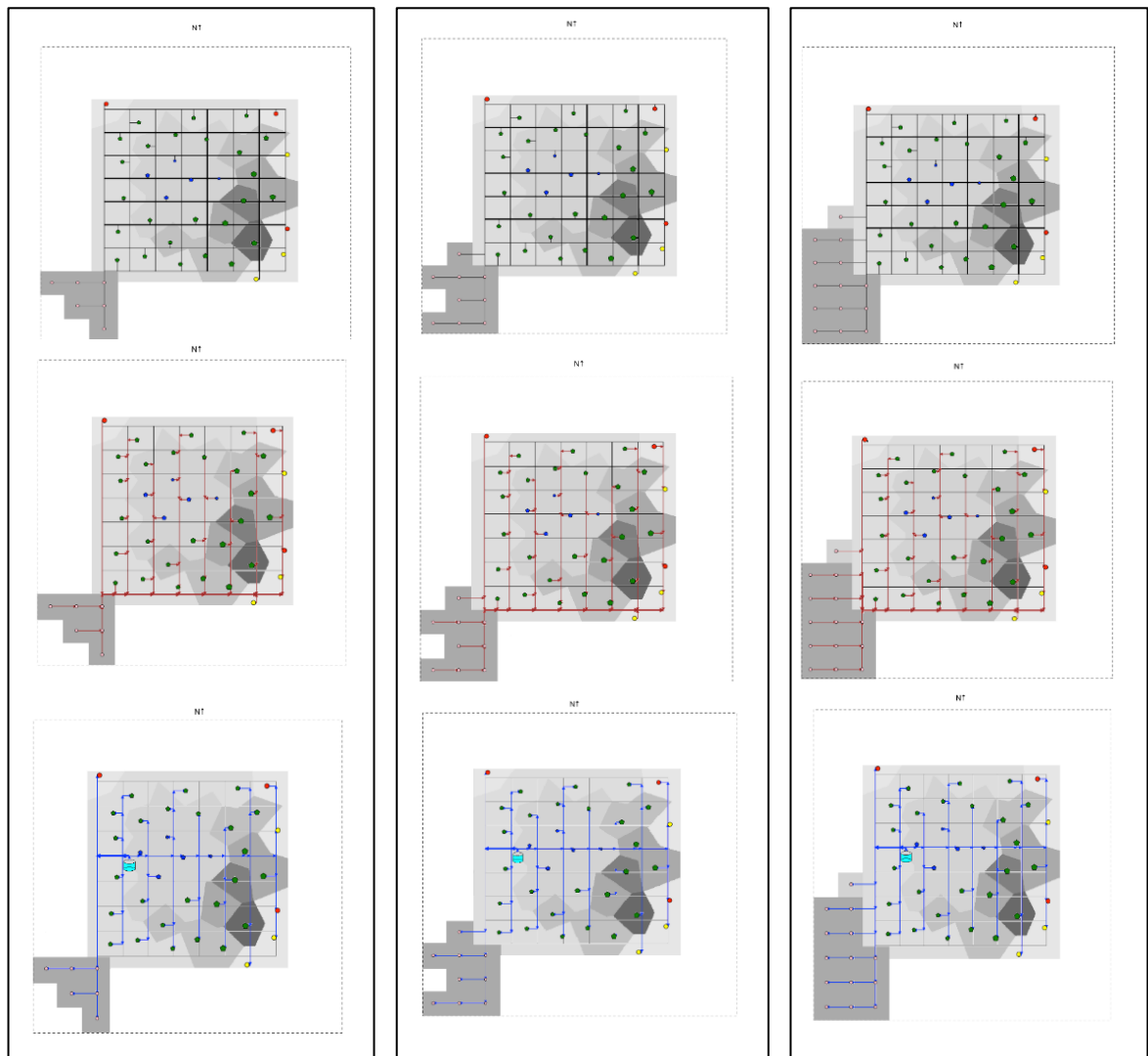


Figura 6.38 - Análise da variação do número e localização das áreas de expansão com o crescimento populacional sofrido pela cidade (20%, 30%, 45%).

À medida que o crescimento populacional é maior, também o número de áreas de expansão necessário é maior. Verifica-se que a população é distribuída pelas áreas de expansão aproveitando a densidade populacional máxima permitida.

Apresenta-se nas Figuras 6.39 à 6.41 e na Tabela 6.17 a caracterização da melhor solução para a situação em que se verifica um crescimento populacional de 30 % considerando duas densidades na expansão (consultar também o anexo C).

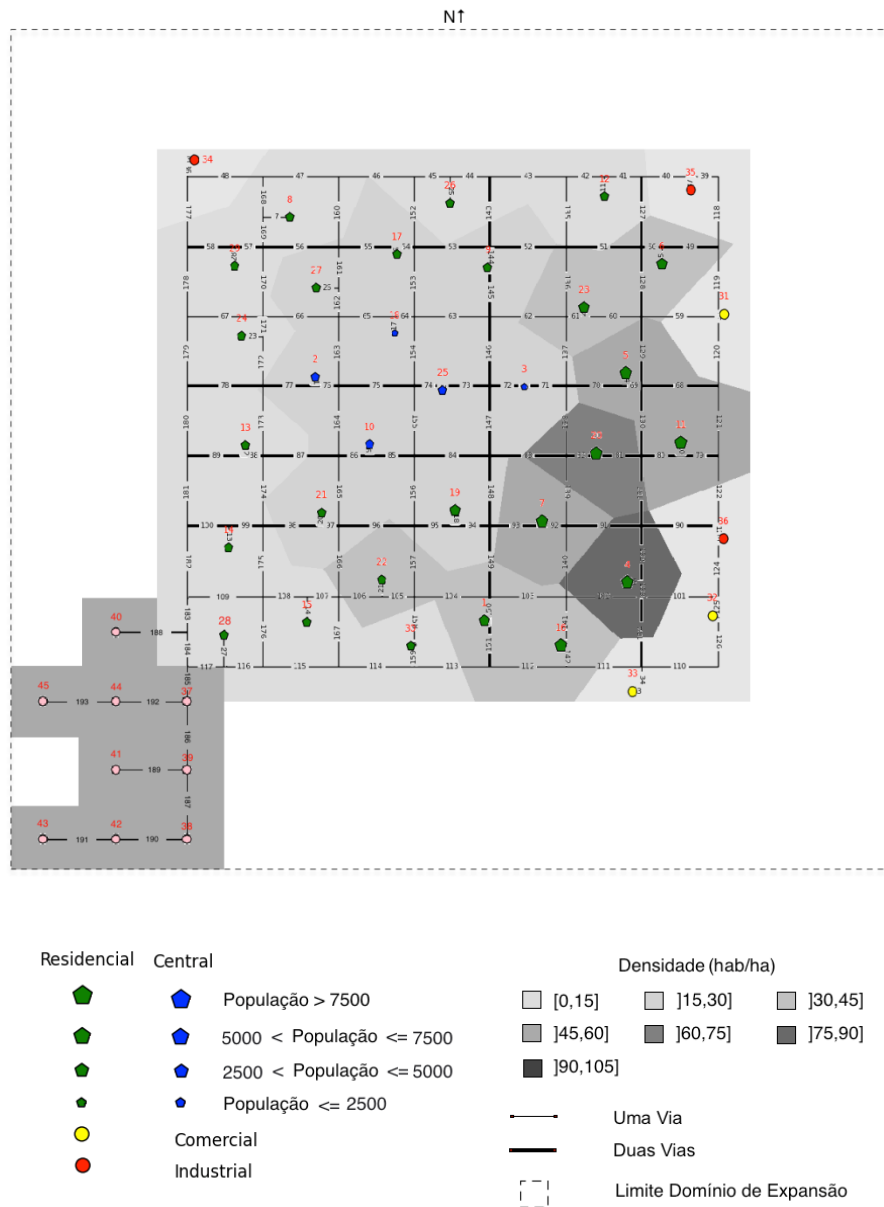


Figura 6.39 - Caracterização da solução de custo mínimo, para um crescimento populacional de 30 % e considerando duas densidades na expansão – rede de transportes.

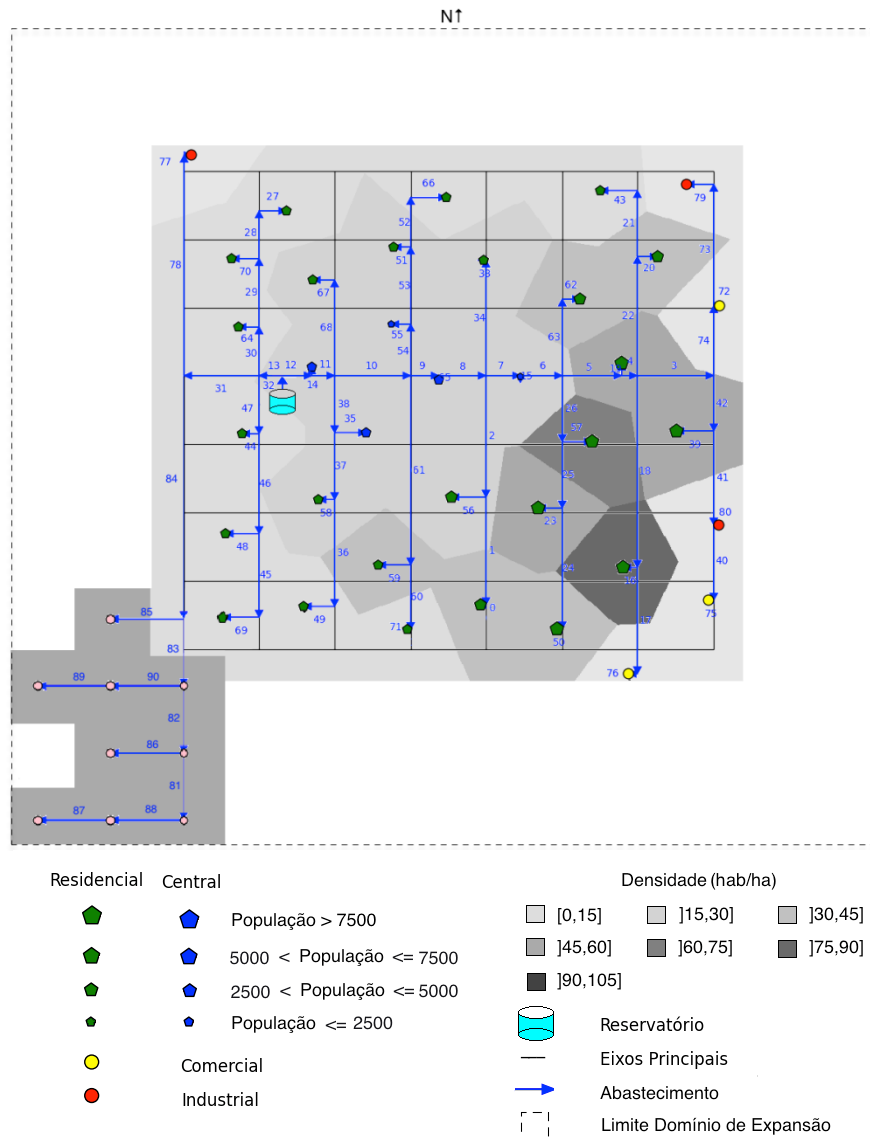


Figura 6.40 - Caracterização da solução de custo mínimo, para um crescimento populacional de 30 % e considerando duas densidades na expansão – rede de abastecimento.

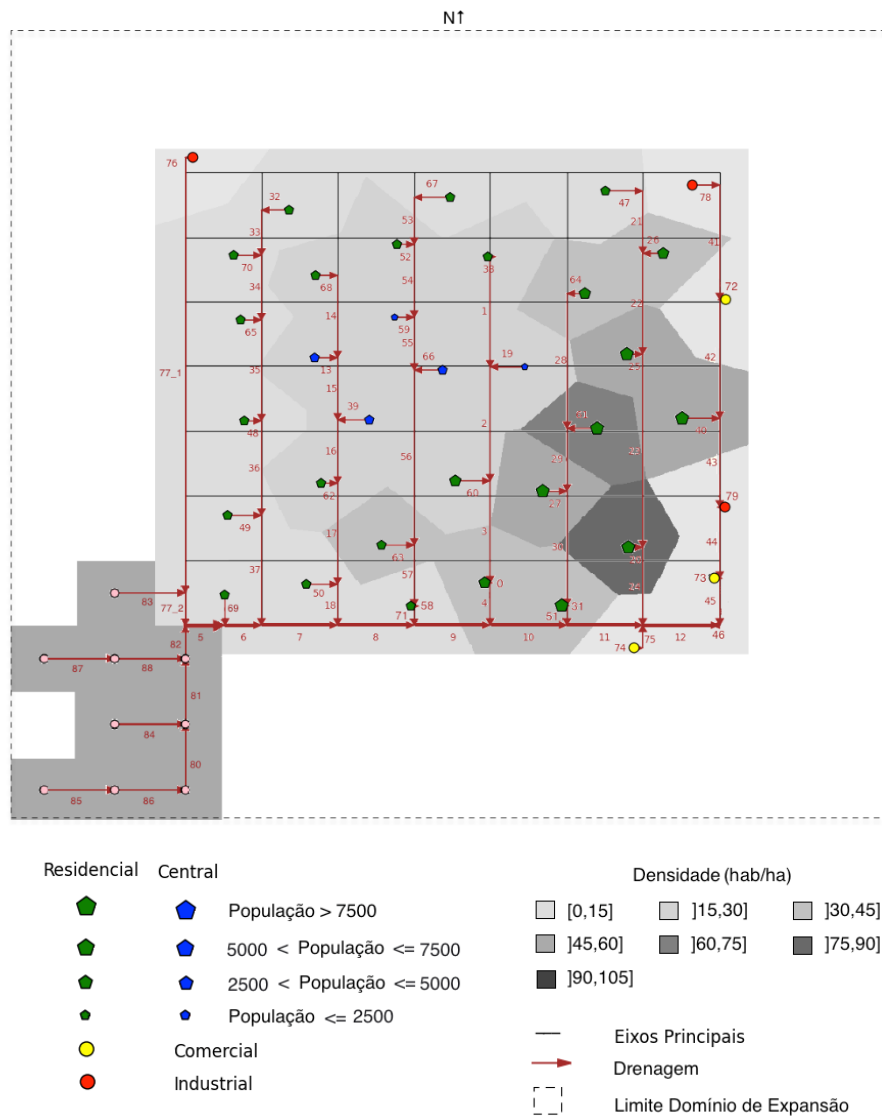


Figura 6.41 - Caracterização da solução de custo mínimo, para um crescimento populacional de 30 % e considerando duas densidades na expansão – rede de drenagem.

Tabela 6.17 – Caracterização dos novos centróides na solução de custo mínimo considerando uma cidade média, crescimento populacional de 30 % e duas densidades permitidas na expansão.

Avaliação do Índice de Aptidão					Densidade populacional hab/ha	População dos novos centróides
ID	Inclinação	Exp. Solar	Permeabilidade	Valor		
37	ideal	boa	0	3	50	5000
38	ideal	boa	0	3	50	5000
39	ideal	boa	0	3	50	5000
40	ideal	boa	0	3	50	5000
41	ideal	boa	0	3	50	5000
42	ideal	boa	0	3	50	5000
43	fraca	boa	0	3	50	5000
44	ideal	boa	0	3	50	5000
45	fraca	boa	0	3	50	5000

Verifica-se que independentemente do crescimento populacional, é sempre escolhida a mesma zona do domínio de expansão, zona sudoeste. Trata-se de uma zona que permite distribuir a máxima densidade populacional, 50 hab/ha, devido ao elevado Índice de Aptidão, neste caso 3 (ver Figura 6.20), minimizando assim o número de novas áreas necessárias para distribuir o incremento populacional.

Por outro lado, estas áreas surgem concentradas e não dispersas, desta forma minimizam-se os comprimentos das redes que servem as novas áreas de expansão.

Igualmente, ao escolher áreas com elevado Índice de Aptidão está-se a contribuir para traçados de redes mais económicos uma vez que aquele índice é calculado em função das características físicas do terreno, nomeadamente a sua inclinação. Inclinações mais apropriadas à construção levam a perfis mais suaves no traçado das infraestruturas tendo impacto, por exemplo, no cálculo de alturas de elevação nas redes de drenagem e abastecimento de água.

A análise que se segue centra-se na forma como as diferentes combinações de pesos dos objetivos afetam as soluções obtidas e o valor da função objetivo.

As soluções apresentadas são relativas mais uma vez à cidade média, com um crescimento populacional de 30% e duas densidades populacionais permitidas, 50 hab/ha e 25 hab/ha.

Já se referiu que, como se trata de um problema multiobjetivo, ao considerarem-se várias combinações de pesos, trabalha-se em diferentes zonas do espaço das soluções, isto é diferentes regiões da Fronteira de Pareto, assunto já explicado anteriormente.

Para a combinação 1 o resultado é o ilustrado na Figura 6.42.

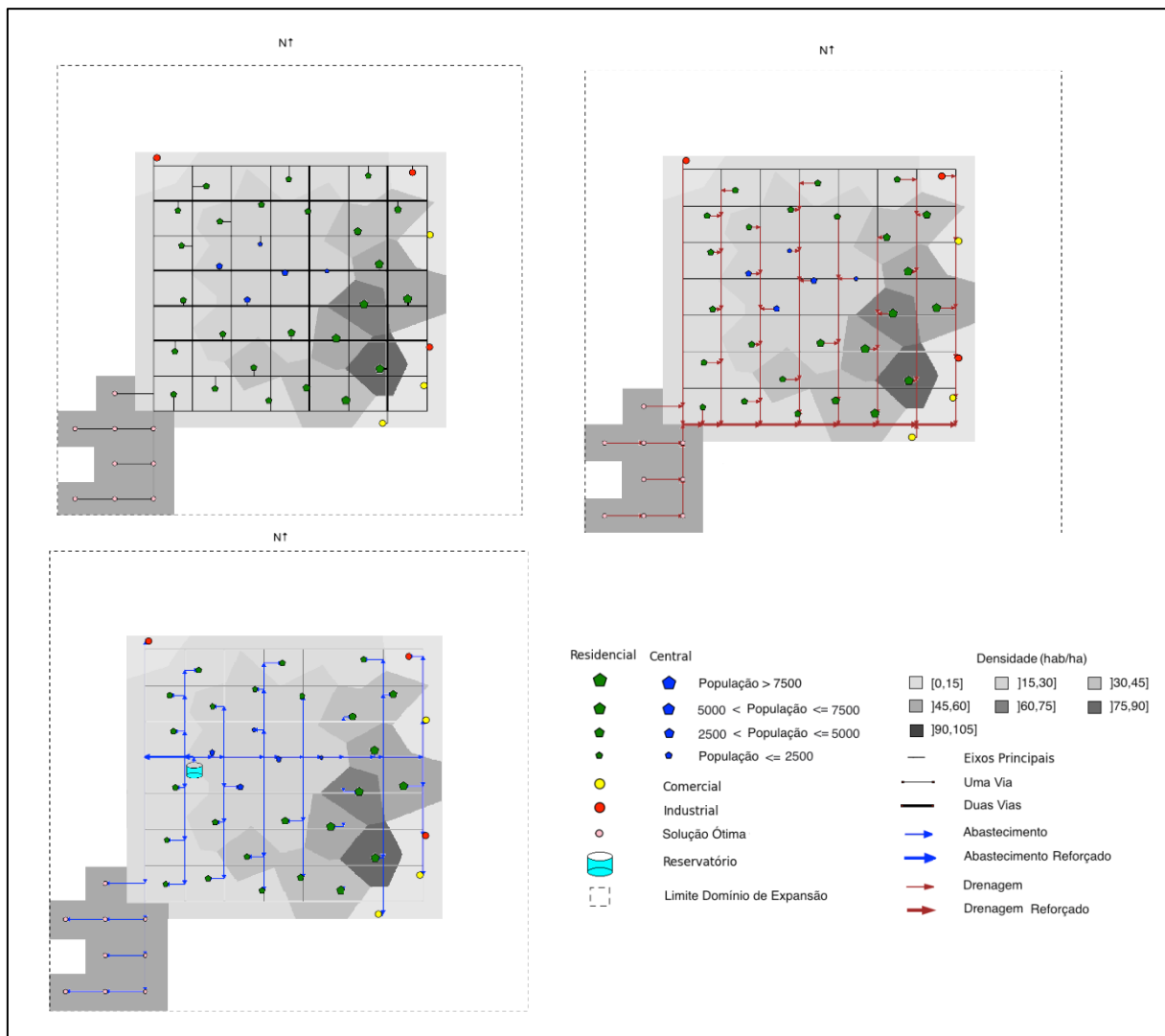


Figura 6.42 - Combinação 1: pesos iguais para todos os componentes da função objetivo.

Nesta execução todos os objetivos têm o mesmo peso. A localização das novas áreas de expansão faz-se sobre a zona sudoeste da cidade. Esta distribuição leva a um reforço da rede de abastecimento existente pequeno e a um reforço mais significativo da rede de drenagem. O reforço da rede de drenagem seria mínimo por exemplo se as áreas de expansão se situassem sobre a zona sudeste da cidade (onde o Índice de Aptidão também é elevado), pois estariam mais perto da descarga para o emissário. Mas repare-se que também na zona sudeste da cidade existente é onde os centróides são mais populosos, por isso, se as áreas de expansão se

situassem também sobre esta zona, esta iria ficar congestionada em termos de tráfego. Daqui resultaria um aumento substancial dos tempos de viagem, um dos parâmetros contabilizados no componente de transportes da função objetivo. Claramente, com os pesos iguais atinge-se um equilíbrio dos três componentes da função objetivo.

Para a combinação 2 o resultado é o ilustrado na Figura 6.43.

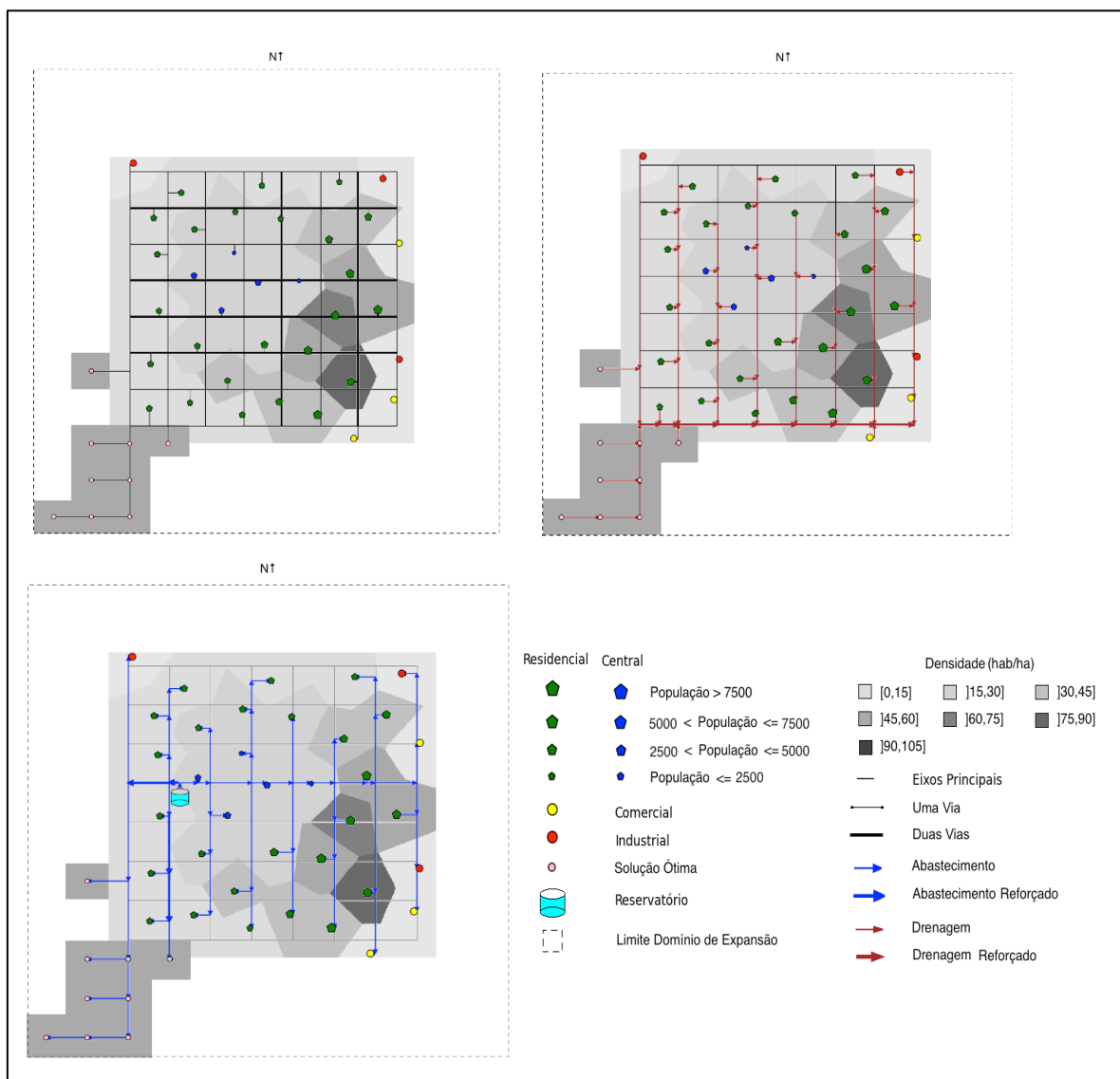


Figura 6.43 - Combinação 2: peso superior para o componente relativo à rede de transportes.

Dando um peso superior ao componente de transportes na função objetivo, verifica-se que a distribuição das novas áreas de expansão pouco difere da anterior, continuando a situar-se na zona sudoeste da cidade. Pode verificar-se (no anexo D) que tanto em relação aos valores globais da função objetivo como aos valores parciais, esta solução é muito similar à anterior (para a combinação de pesos 1, o valor da função objetivo é 0.90, para a combinação de pesos 2, o valor da função objetivo é 0.97). Isto permite concluir que, quando os pesos são iguais para todos os componentes da função objetivo, o dos transportes tem grande influência na solução final, sendo a disposição das novas áreas de expansão fortemente condicionada por aquela rede. De facto, uma disposição diferente das novas áreas de expansão, como já se abordou na análise anterior, iria condicionar bastante o valor deste componente daí se chegarem a resultados muito parecidos com a combinação 1 e a combinação 2.

Para a combinação 3 o resultado é o ilustrado na Figura 6.44.

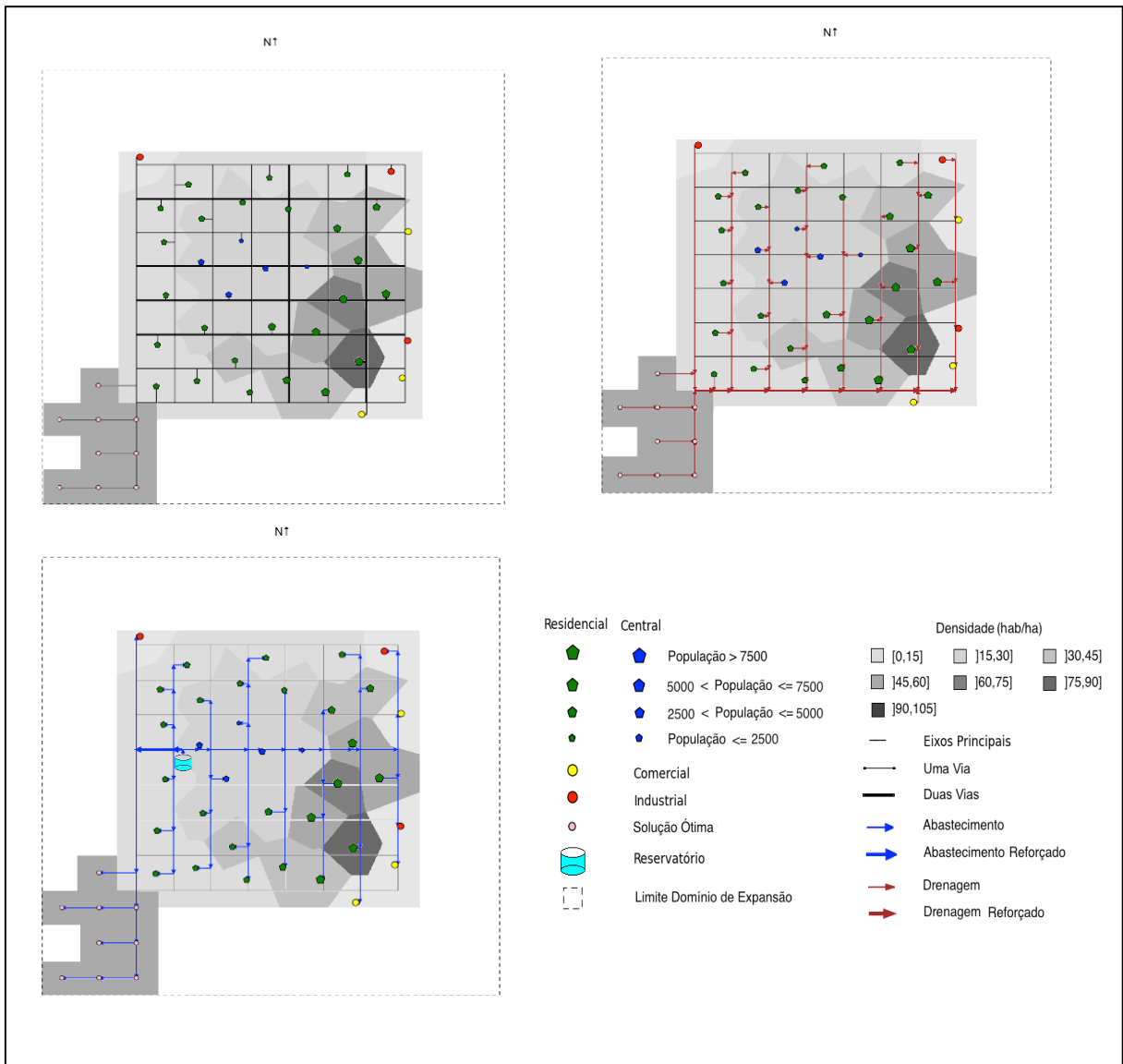


Figura 6.44 - Combinação 3: peso superior para o componente relativo à rede de abastecimento de água.

Neste caso, chega-se à mesma distribuição das novas áreas de expansão obtida com a combinação 1, pois, pelas circunstâncias já referidas, aquela é a distribuição que minimiza, o comprimento da rede de abastecimento de água. As novas áreas de expansão concentram-se numa área do domínio de expansão com Índice de Aptidão elevado atribuindo a densidade populacional máxima permitida, minimizando desta forma o número de novas áreas e a distância ao reservatório abastecedor.

Para a combinação 4 o resultado é o ilustrado na Figura 6.45.

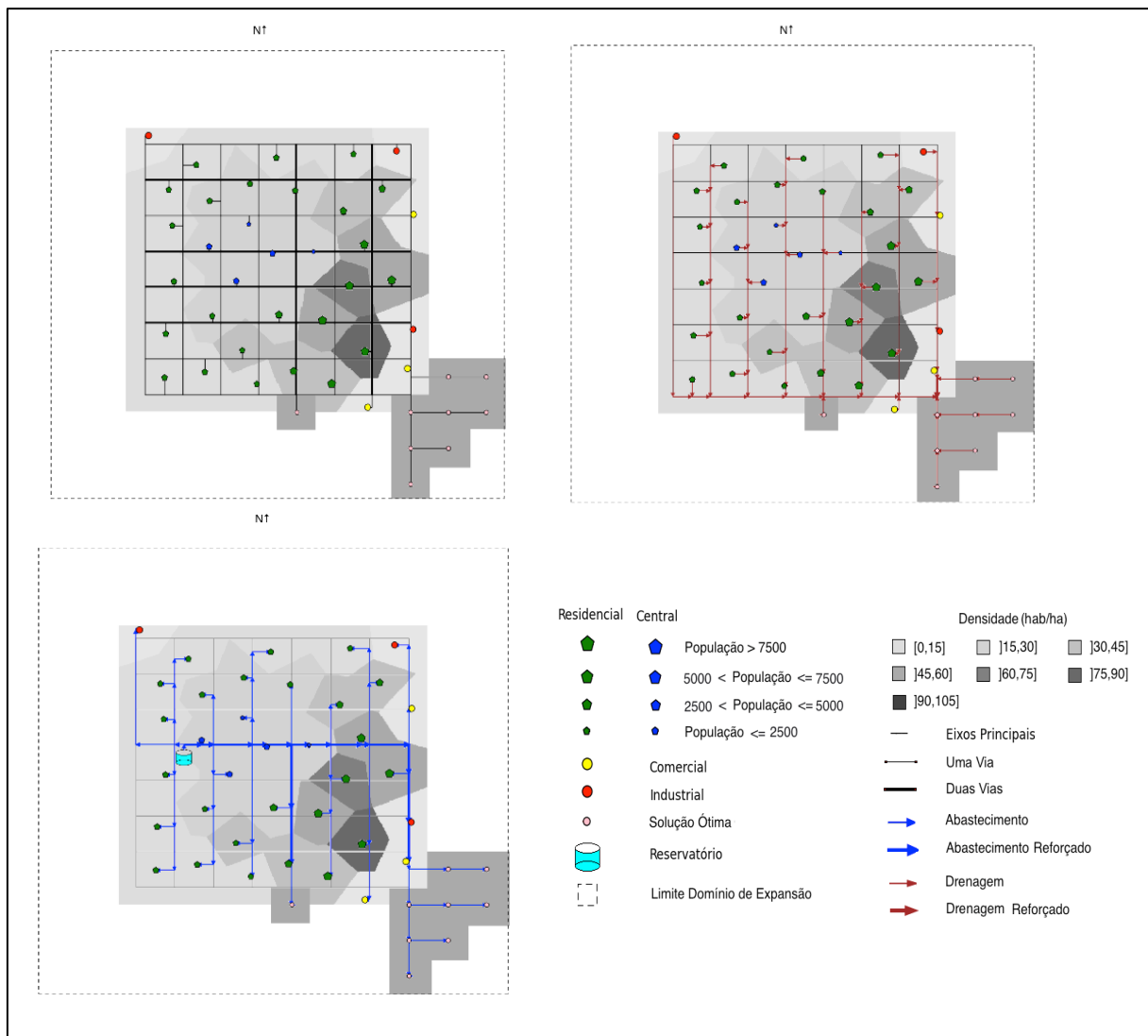


Figura 6.45 - Combinação 4: peso superior para o componente relativo à rede de drenagem.

A solução obtida com o componente da função objetivo relativo à rede de drenagem mais pesado (combinação de pesos 4) é a esperada, em função do que antes foi dito. O número de áreas de expansão é o mesmo que o obtido nas execuções anteriores, 9, mas desta vez localizam-se maioritariamente sobre a zona sudeste da cidade (já se referiu que aqui o Índice de Aptidão também é elevado). De facto, desta forma é menor o valor do comprimento de rede de drenagem reforçada uma vez que a descarga para o emissário é quase direta (para a combinação de pesos 1, o valor é de 0.112, para a combinação de pesos 2, o valor é de 0.108,

para a combinação de pesos 3, o valor é de 0.108 e para a combinação de pesos 4, o valor é de 0.029). Os valores dos outros componentes da função objetivo sofrem aumentos, nomeadamente o tempo total de viagem relativo à rede de transportes (com a combinação de pesos 2, o tempo total de viagem é de 0.208 e com a combinação 4, é de 0.500), que são compensados, precisamente pela diminuição do componente da rede de drenagem.

Para terminar esta análise, uma questão que se entende pertinente abordar neste contexto diz respeito ao facto de, apesar de se ter apresentado a Fronteira de Pareto, ela não ser construída no presente trabalho. De facto, ao invés daquela construção, definiram-se as quatro combinações de pesos analisadas anteriormente, trabalhando-se assim em quatro regiões diferentes daquela Fronteira.

São definidas especificamente aquelas combinações porque à partida se tem uma noção mais ou menos clara de quais os resultados requeridos por quem recebe a informação proveniente da análise estratégica da expansão de infraestruturas urbanísticas.

No entanto ao resolver o problema, como já foi dito e explicado, foi utilizado um método de aproximação da Fronteira de Pareto para garantir o encontro de soluções não dominadas.

Neste sentido e para fazer prova da não dominância das soluções obtidas pelo algoritmo do Recozimento Simulado aplicado em consonância com aquele método, apresenta-se a Tabela 6.18.

Tabela 6.18 – Análise da não dominância das soluções obtidas.

	Abastecimento	Drenagem	Transportes	Função Objetivo	Tempo de execução (h)
Combinação 1	0.561	1.056	1.083	0.900	23.22
Combinação 2 (transportes)	0.748	1.436	0.714	0.903	17.86
Combinação 3 (abastecimento)	0.330	1.480	1.464	0.901	23.15
Combinação 4 (drenagem)	1.140	0.388	2.600	1.129	22.70

Na Tabela 6.18 apresentam-se os valores relativos às melhores soluções encontradas com cada uma das quatro combinações consideradas e os respetivos valores totais relativos aos componentes considerados na função objetivo. Como se pode observar, são de facto quatro soluções não dominadas uma vez que o melhoramento de um dos componentes é feito à custa da deterioração de pelo menos um dos outros componentes.

Um aspeto que ressalta das análises feitas até então é que, tendo possibilidade para tal, as áreas de expansão são localizadas em terrenos com Índice de Aptidão elevado, sendo-lhes atribuída a máxima densidade populacional permitida.

Com o objetivo de diversificar a oferta relativa às áreas de expansão permitindo desta forma a quem ocupa aquelas áreas decidir por uma maior ou menor densidade populacional (por exemplo decidir entre uma zona de moradias e uma zona de blocos habitacionais), apresentam-se a seguir os resultados obtidos obrigando a que as zonas de expansão de baixa e alta densidade tenham aproximadamente a mesma área.

A solução inicial e as soluções candidatas são geradas de acordo com o que foi dito anteriormente. No entanto ao fazer a análise de uma solução candidata verifica-se se esta considera uma diferença entre área de expansão com densidade elevada e área com densidade baixa, inferior à verificada na solução analisada anteriormente. Só se tal se verificar é que será avaliada pelo critério de Metropolis.

Nesta análise é utilizada a cidade de dimensão média com 150000 habitantes apresentada no Anexo A. Considera-se que esta sofre um crescimento populacional de 45%, a distribuir em partes iguais por áreas de expansão com densidade populacional de 50 hab/ha e 25 hab/ha para qualquer combinação de pesos considerada.

Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 6.46, 6.47, 6.48 e 6.49.

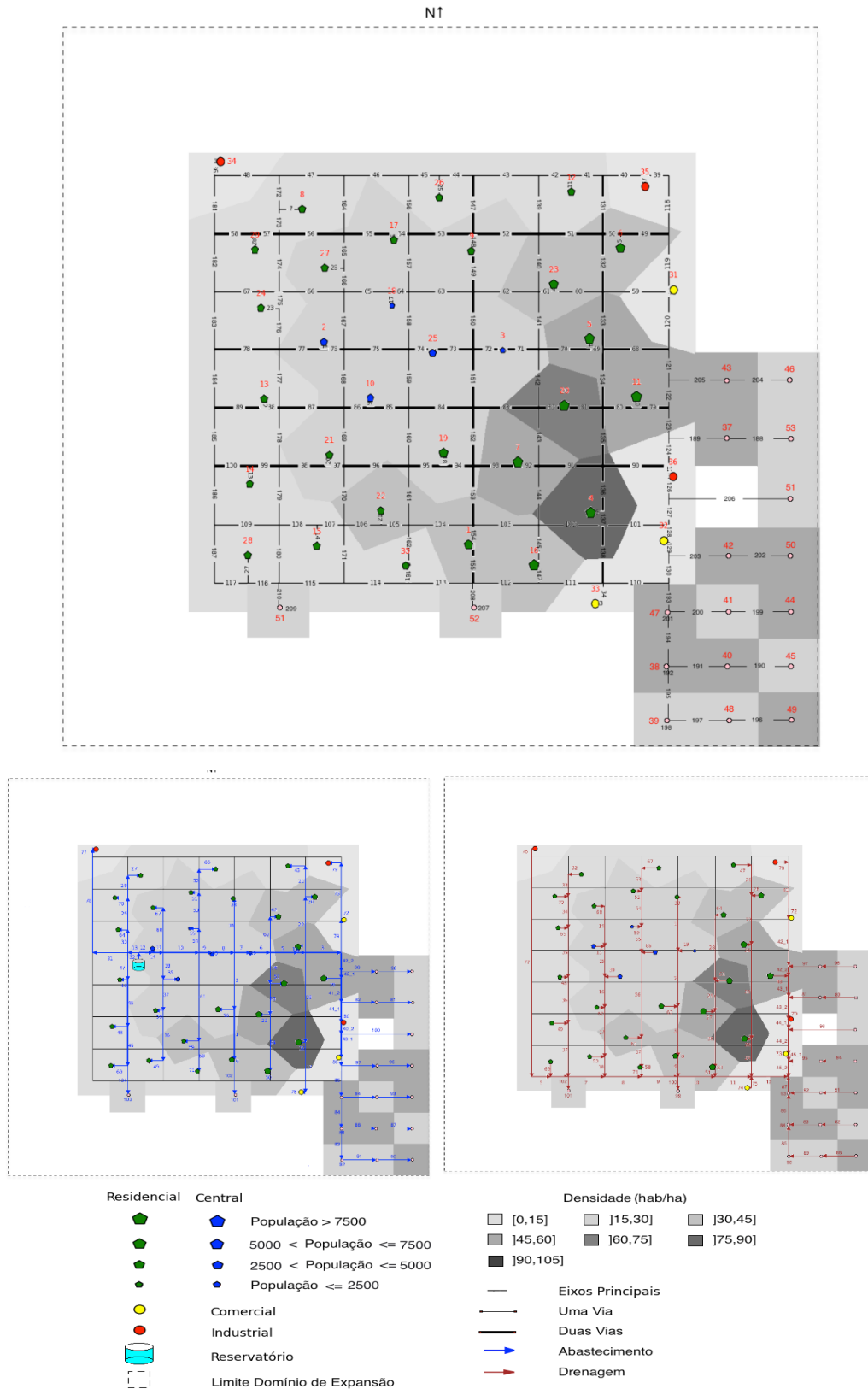


Figura 6.46 - Combinação 1: pesos iguais para todos os componentes da função objetivo.

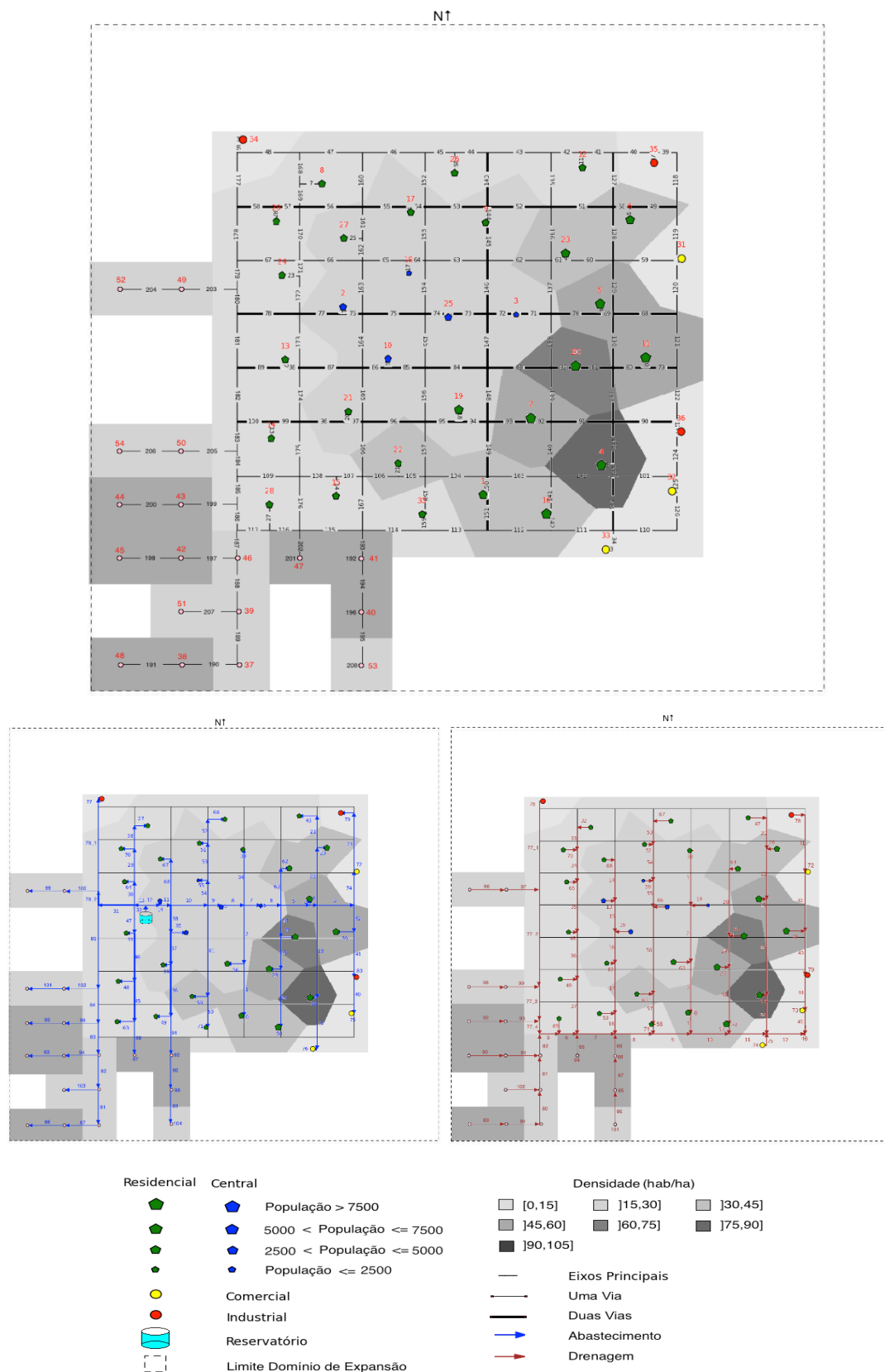


Figura 6.47 - Combinação 2: peso superior para o componente relativo à rede de transportes.

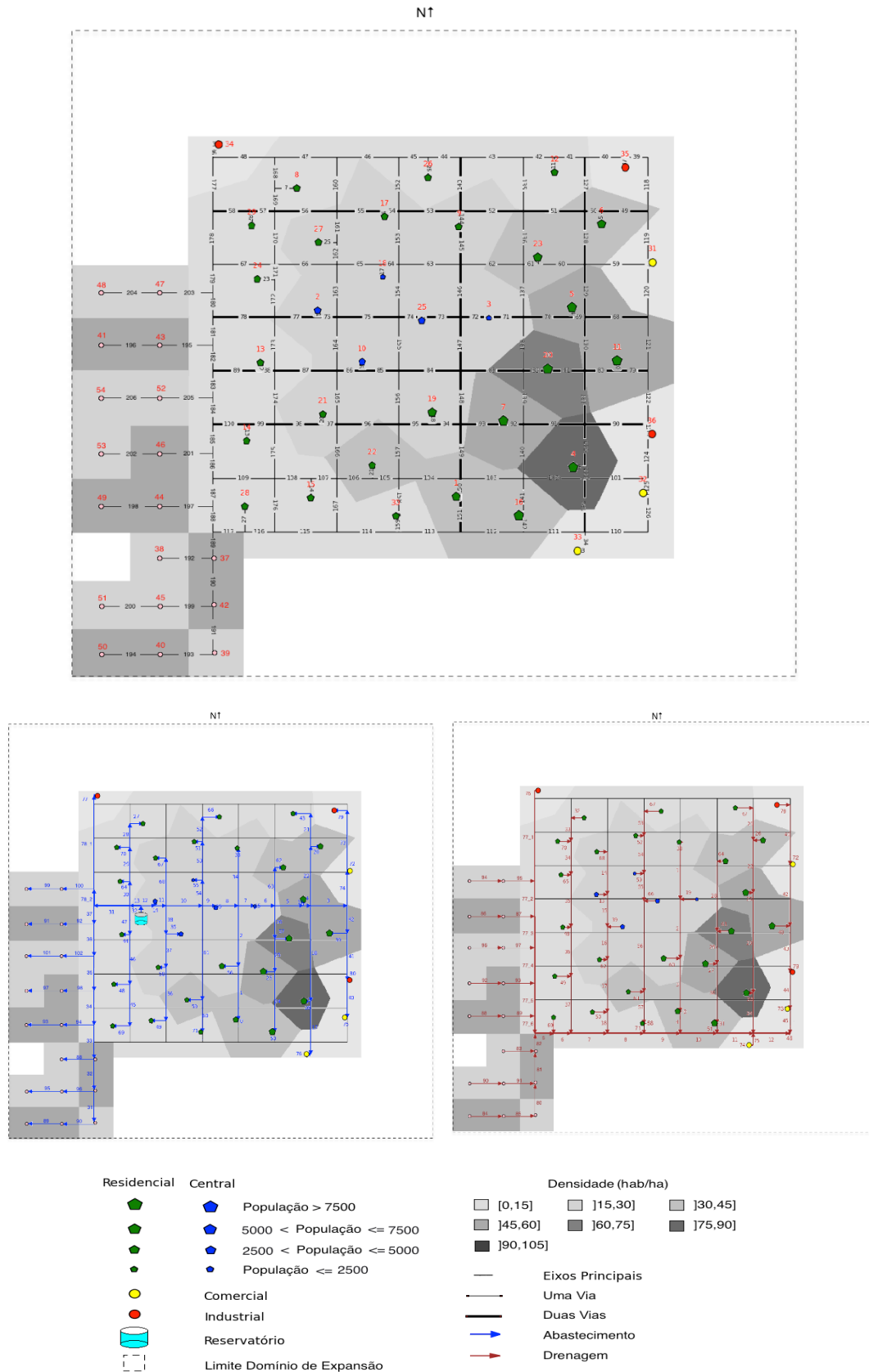


Figura 6.48- Combinação 3: peso superior para o componente relativo à rede de abastecimento.

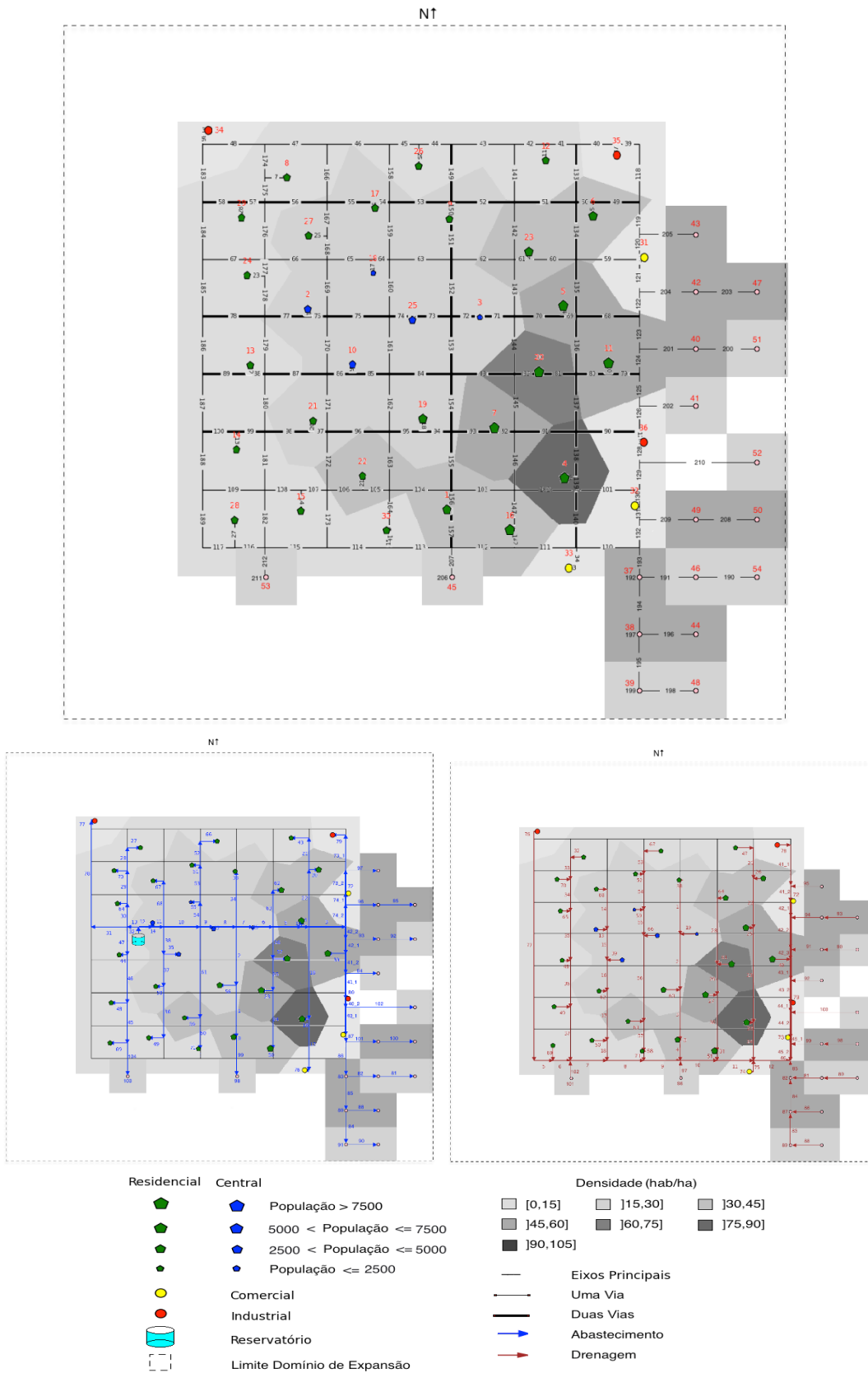


Figura 6.49 – Combinação 4: peso superior para o componente relativo à rede de drenagem.

Uma observação que se pode fazer, à partida, sobre as figuras anteriores, é que se cumpriu efetivamente a proporção 50%/50% entre áreas de expansão com uma densidade populacional mais elevada e áreas de expansão com uma densidade populacional mais baixa (de entre as 18 novas áreas previstas, 9 têm densidade populacional de 25hab/ha e outras 9 têm densidade populacional de 50hab/ha). E havendo possibilidade para tal, as novas áreas são concentradas preferencialmente e uma vez mais, na zona mais a sul do domínio de expansão. No Anexo E apresenta-se informação mais completa sobre os dados e resultados desta análise.

Faz-se de seguida uma análise particular a cada figura. Na Figura 6.46, consideram-se os pesos iguais para todos os componentes da função objetivo, e ao contrário do que acontecia nos casos anteriores em que também se consideravam os pesos iguais, as novas áreas são distribuídas na zona este da cidade. Tal facto deve-se à maior dispersão da nova população por áreas de maior e menor densidade. Desta forma os fluxos de tráfego são mais distribuídos no espaço, não penalizando tanto, em termos relativos, a rede de transportes, pois reduz-se o congestionamento que se fazia sentir quando as áreas tinham todas densidade populacional máxima. Por outro lado, as novas áreas ficam mais perto do final do interceptor e por consequência do emissário, diminuindo o impacto sobre a rede de drenagem.

Na Figura 6.47, a concentração das novas áreas faz-se sobre a zona oeste da cidade uma vez que o componente mais pesado é o dos transportes. É seguida a mesma tendência de quando, às novas áreas, era atribuída a densidade máxima permitida. De facto, já se verificou que, na cidade existente a zona sudeste é a que apresenta maiores densidades populacionais e, mais uma vez, a distribuição das áreas de expansão sobre essa zona do domínio de expansão iria congestionar o tráfego levando a tempos de viagem mais elevados.

Na Figura 6.48 o componente mais pesado é o relativo à rede de abastecimento de água, verificando-se a mesma tendência que anteriormente, quando era atribuída a densidade máxima às novas áreas de expansão, encurtando desta forma a rede nova de abastecimento e a rede existente.

Na Figura 6.49 o componente mais pesado corresponde à rede de drenagem. As novas áreas de expansão são distribuídas uma vez mais, pela zona este da cidade. Este facto, como já se referiu, beneficia a rede de drenagem, tanto ao nível do seu reforço como ao nível do comprimento de rede necessária para abastecer os novos pontos de consumo.

Por último, fizeram-se quatro análises em tudo iguais às anteriores mas considerando que toda a expansão da cidade seria realizada em áreas de baixa densidade (25 hab/ha). Daqui resulta, naturalmente, um maior número de áreas de expansão (passam a ser consideradas 27 novas áreas de expansão). Os resultados obtidos, que dizem respeito a um crescimento populacional de 45% na cidade de 150000 habitantes, são apresentados nas Figuras 6.50, 6.51, 6.52 e 6.53 (dados e resultados adicionais relativos a estas análises encontram-se no anexo F).

Na Figura 6.50, correspondente ao caso em que o peso de todos os componentes da função objetivo é igual, as novas áreas de expansão são distribuídas na zona mais a sul da cidade, mais próxima portanto, do intercetor. A presença de novas áreas nas zonas este e sudeste do domínio de expansão, mais próximas da zona mais populosa da cidade, não afeta tanto a rede de transportes porque são áreas de expansão menos populosas e mais distribuídas no espaço. Atribuindo um peso mais elevado ao componente dos transportes, e como mostra a Figura 6.51, as novas áreas de expansão são, à semelhança de caso anteriores idênticos e pelas mesmas razões, escolhidas na zona oeste da cidade.

Na Figura 6.52, relativa a um maior peso do componente de abastecimento de água, ao invés de casos anteriores nas mesmas condições, as novas áreas de expansão são distribuídas pelas zonas este e oeste da cidade mantendo no entanto, a tendência para a zona mais a sul. De facto, o número de áreas agora é superior e com densidade populacional mais baixa. A localização das novas áreas de expansão na zona oeste do domínio de expansão, favoreceria o traçado e reforço da rede de abastecimento. No entanto verifica-se uma distribuição daquelas áreas no espaço, notando-se que apesar de o componente relativo à rede de abastecimento ter maior peso na função objetivo, não deixa de haver consonância com o traçado das outras redes.

Finalmente, a Figura 6.53 mostra que na situação do componente de drenagem ser o mais pesado (combinação de pesos 4), as novas áreas de expansão surgem no lado direito de maneira a que a rede de drenagem tenha de ser pouco reforçada, pois desta forma os novos pontos de consumo localizam-se mais perto da descarga para o emissário (para a combinação de pesos 1 o valor é de 0.237, para a combinação de pesos 2 o valor é de 0.210, para a combinação de pesos 3 o valor é de 0.102 e para a combinação de pesos 4 o valor é de 0.057).

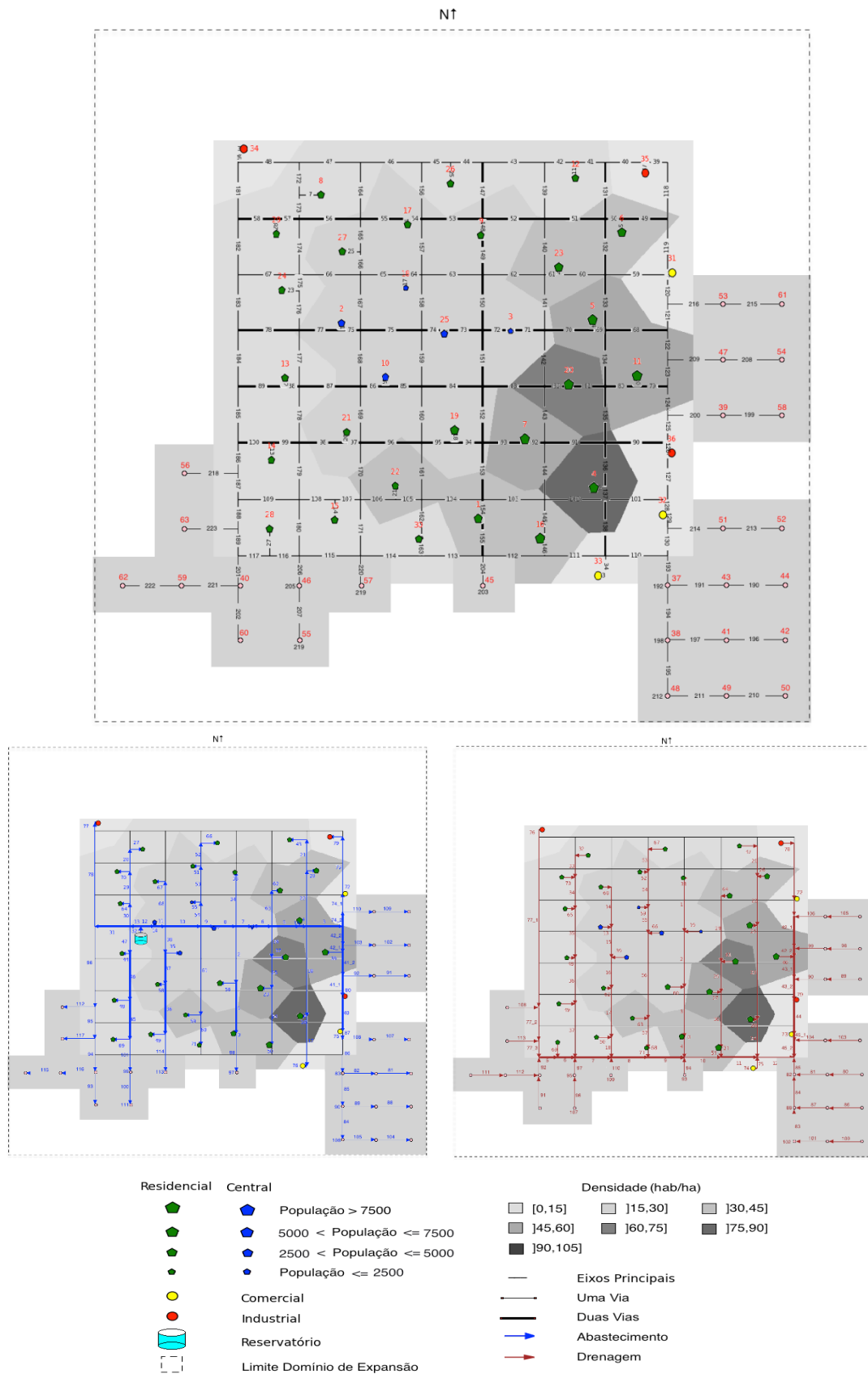


Figura 6.50 – Combinação 1: pesos iguais para todos os componentes da função objetivo.

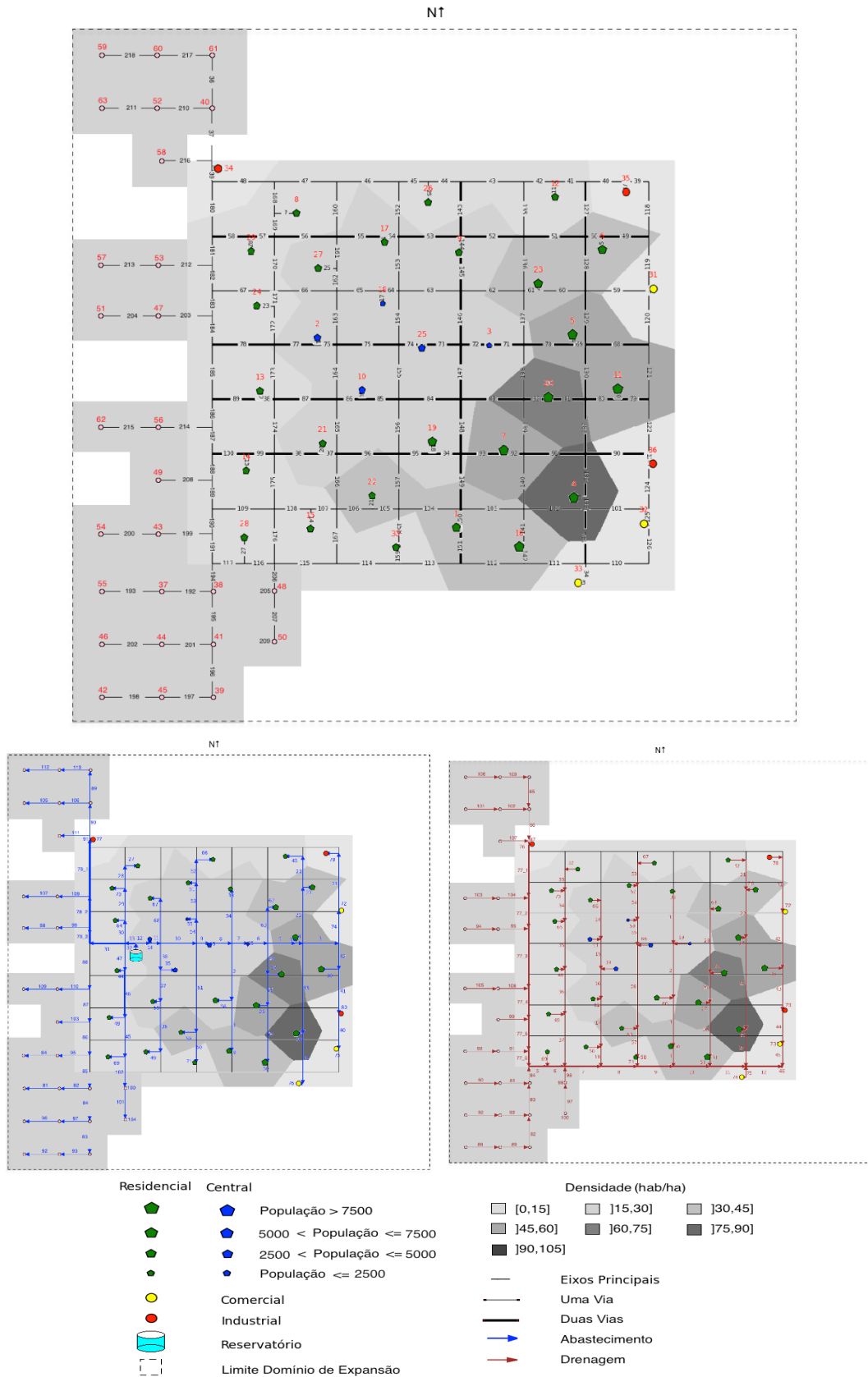


Figura 6.51 – Combinação 2: peso superior para o componente relativo à rede de transportes.

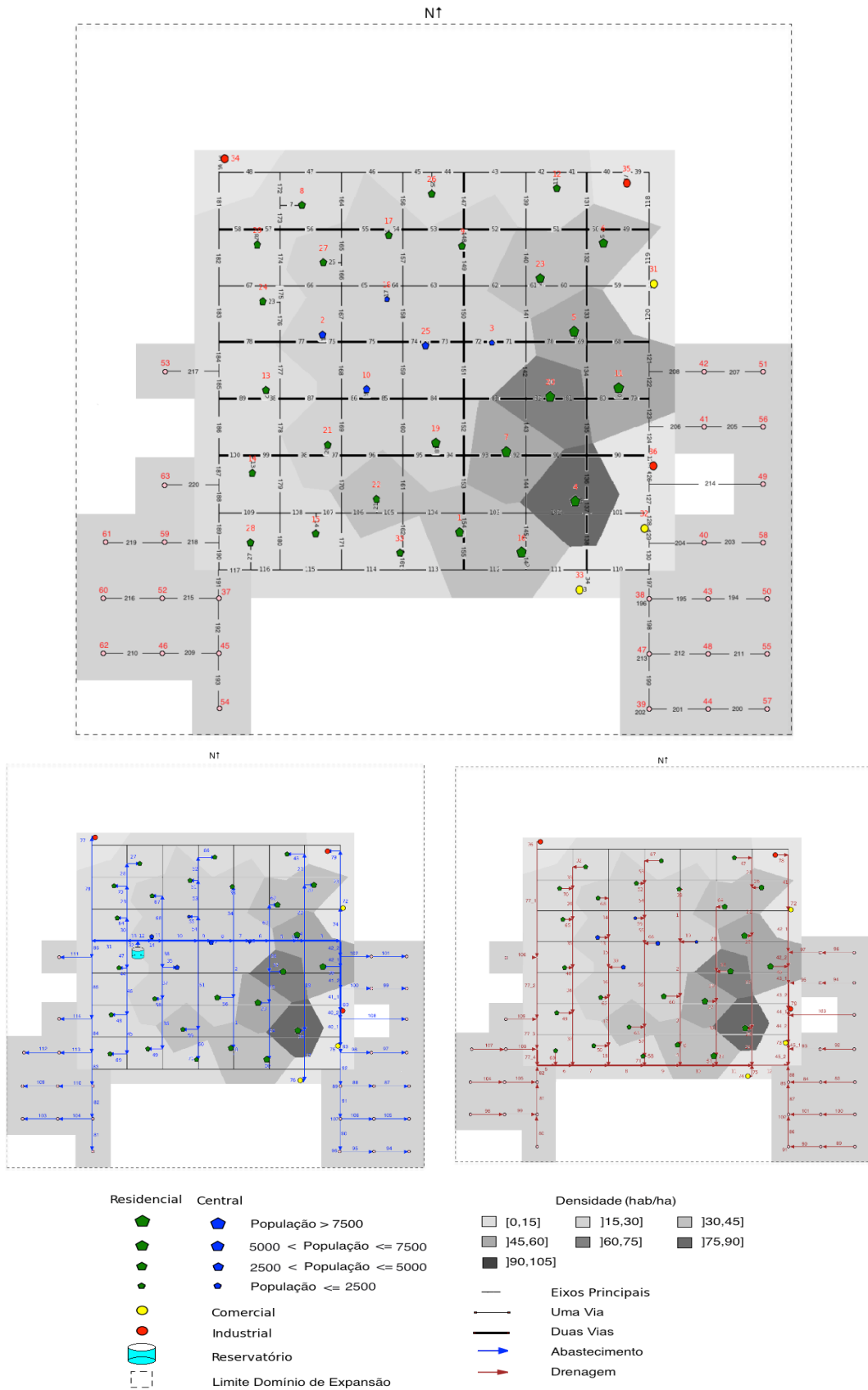


Figura 6.52 – Combinação 3: peso superior para o componente relativo à rede de abastecimento.

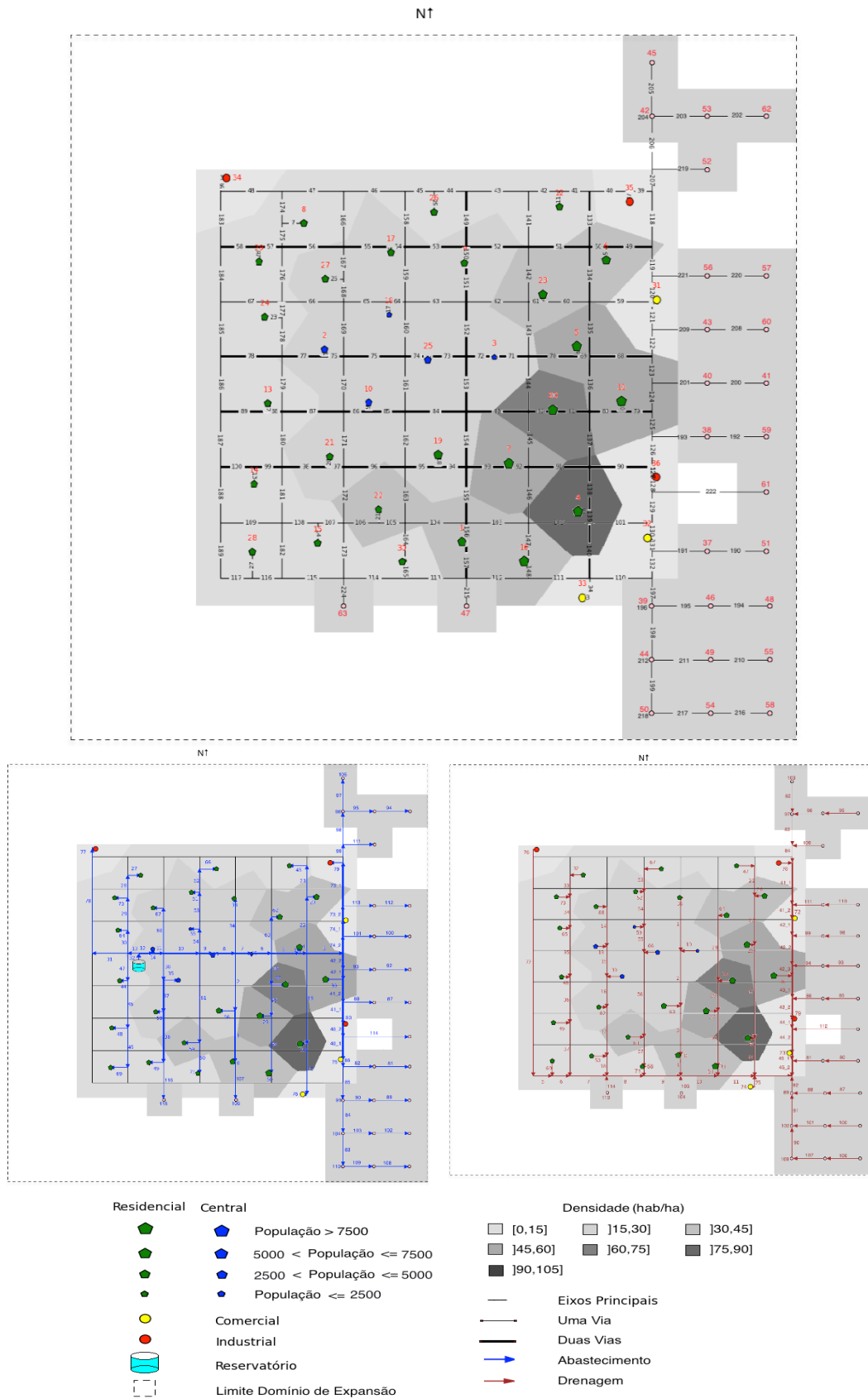


Figura 6.53 – Combinação 4: peso superior para o componente relativo à rede de drenagem.

As observações retiradas da análise de resultados precedente estão dependentes da forma como é caracterizada a cidade sobre a qual recai o estudo. No presente trabalho foram consideradas cidades hipotéticas onde o Índice de Aptidão toma uma grande relevância no que diz respeito à caracterização do território.

As análises apresentadas estão ainda dependentes dos cenários que são construídos. Neste caso fez-se variar o tamanho da cidade, as densidades populacionais máximas permitidas, a percentagem de crescimento populacional, o peso de cada componente na função objetivo mas outras situações poderiam ter sido traçadas.

Estão igualmente dependentes dos indicadores nomeados para as análises realizadas. Neste caso consideram-se o número de novas áreas de expansão, densidades populacionais atribuídas e as características das infraestruturas após expansão mas outros poderiam ter sido tomados.

No programa computacional construído, já se disse, pode ser considerada uma cidade real e todas as características que lhe são peculiares, outros cenários podem ser arquitetados, bem como outros indicadores podem ser postos em análise.

De uma forma ou de outra, num trabalho como este, o objetivo não passa por encontrar uma solução efetiva e concreta, quer para a localização das novas áreas de expansão, quer para o consequente desenho das infraestruturas consideradas no estudo, mas sim, um conjunto de linhas orientadoras/recomendações que, ao ser dado a conhecer aos responsáveis pelo planeamento do território, constituem uma ferramenta de apoio à decisão e fornecem informação para o posterior traçado e dimensionamento de cada infraestrutura agora ao nível do projeto.

Da avaliação dos vários cenários construídos no presente trabalho advém um conjunto de soluções que, como já se disse, pretendem apoiar as tomadas de decisão por parte dos planeadores urbanísticos.

Nomeiam-se, assim, algumas conclusões, agora em jeito de súmula final, do estudo realizado no presente trabalho, mais concretamente neste subcapítulo:

- verifica-se que, como era de esperar, quanto maior o incremento populacional sofrido, maior o número de zonas de expansão necessário, no entanto este número tem tendência a ser minorado pela atribuição àquelas zonas, das densidades máximas permitidas;
- verifica-se que existe uma concentração das novas áreas de expansão, isto é, elas surgem de uma forma contígua e não dispersas no espaço, o que minimiza o comprimento dos novos traçados das redes consideradas;
- verifica-se que a localização das novas áreas de expansão é feita na zona sul da cidade com maior incidência na zona sudoeste, zona onde o Índice de Aptidão, índice que serve para caracterizar fisicamente o território da cidade, toma valores mais elevados;
- verifica-se que a infraestrutura dos transportes tem um grande peso nas soluções apresentadas, ditando uma vez mais a localização das novas áreas de expansão na zona sudoeste da cidade pois, para além de ser a que apresenta melhores características para edificação, é também uma zona pouco populosa em termos da cidade existente. A expansão naquele sentido é a que contribui para o menor congestionamento de tráfego e por isso minora o tempo total de viagem sobre a rede.

7 CONCLUSÃO

7.1 Sumário

Já se referiu que com este trabalho não se pretende, nem seria exequível, substituir a análise setorial relativa ao comportamento de cada infraestrutura que integra uma cidade quando existe um aumento populacional e conseqüente necessidade de expansão do seu território.

No entanto, ao nível do planeamento e tendo em conta a interação facilmente reconhecida entre as infraestruturas que servem a cidade, a presente análise consegue produzir um conjunto de princípios orientadores no sentido do apoio à decisão aos responsáveis pelo planeamento de um aglomerado urbano, que tem em conta a interação e o conflito de interesses que pode existir quando cada infraestrutura procura cumprir os seus objetivos.

Nesta tese faz-se, assim, a análise estratégica da expansão das infraestruturas urbanísticas pela construção e resolução de um modelo de apoio à decisão onde aquelas infraestruturas e os seus traçados são considerados de uma forma integrada e onde as novas áreas de expansão, necessárias prever aquando do crescimento de uma cidade, são tratadas como incógnitas e não como conhecidas à partida.

Através da aplicação do modelo desenvolvido, os responsáveis pelo planeamento de infraestruturas de uma cidade estarão em condições de intervir de uma forma mais informada e efetiva nos processos de planeamento do território e, em particular, no que diz respeito à localização de novas áreas de expansão, tendo em conta as características físicas do terreno e o comportamento integrado das três infraestruturas em análise.

Como foi referido no Capítulo 2, nem sempre a expansão das infraestruturas urbanísticas implica a sua ampliação, mas somente o redimensionamento e reforço do que existe, para

fazer face ao aumento do consumo. Por outro lado, quando a ampliação é necessária, cada infraestrutura é tratada de uma forma isolada e tendo em conta as recomendações de localização das novas áreas de expansão, muitas vezes baseadas apenas nas características físicas do terreno. A análise integrada das infraestruturas é necessária e indispensável para que melhores decisões sobre a expansão urbana sejam tomadas, surgindo o modelo apresentado nesta tese como instrumento para apoiar estas decisões.

No Capítulo 3 descreve-se de uma forma genérica, a metodologia a adotar perante um problema de expansão de infraestruturas urbanas, desde a caracterização do problema, passando pela recolha de dados, formulação e resolução do modelo de apoio à decisão, e finalmente, análise dos resultados no sentido de produzir a informação necessária a ser cedida aos agentes de decisão.

Caracterizado o problema que se pretende resolver, este é traduzido num modelo matemático de otimização representativo da problemática descrita, apresentado no Capítulo 4 e que concretiza o primeiro objetivo operacional do trabalho. Este modelo é constituído por uma função objetivo e pelas respetivas restrições. Neste caso, como se contemplam três infraestruturas, cada uma com as suas especificidades e objetivos, aquela função representa vários componentes.

Depois de caracterizado o problema e construído o modelo de apoio à decisão, há que, perante as suas características, escolher um método de resolução apropriado, o que constitui o segundo objetivo operacional do trabalho. O método utilizado na presente tese combina um algoritmo de Recozimento Simulado com uma técnica de aproximação da Fronteira de Pareto. A utilização desta técnica é necessária por estar em causa um problema multiobjetivo. Assim, no Capítulo 5, começa por ser feita uma exposição do Recozimento Simulado, desde a sua história e analogia ao processo físico em que é baseado até à apresentação do algoritmo.

Em seguida, a parte final do capítulo debruça-se sobre os problemas multiobjetivo e, em particular, sobre o método de aproximação da Fronteira de Pareto.

No Capítulo 6 faz-se a aplicação da metodologia descrita, concretizando-se assim, o terceiro e quarto objetivos delineados no trabalho, uma vez que para fazer aquela aplicação é necessário implementar um programa computacional que permita executar as análises pretendidas a cidades hipotéticas. Na construção destas cidades são contemplados todos os aspetos principais que caracterizam uma cidade, tentando que elas sejam, o mais possível, representativas das cidades reais.

A aplicação da metodologia utiliza, como acima foi referido, o algoritmo de Recozimento Simulado. A execução deste algoritmo envolve a calibração de alguns parâmetros, de maneira a encontrar os valores que permitem obter as soluções de boa qualidade com um esforço computacional aceitável.

Depois de feita esta calibração para uma das cidades hipotéticas consideradas, e ainda no Capítulo 6, faz-se a análise dos resultados. Esta análise tem início com a demonstração da robustez do algoritmo para se garantir a devida confiança nos resultados obtidos. Esta robustez fica comprovada pelo facto das soluções obtidas praticamente não variarem em diferentes execuções do algoritmo (que comporta elementos de aleatoriedade). Com efeito, os desvios do custo das melhores soluções encontradas em cada uma das execuções em relação à que apresentou um custo mínimo são nulos ou muito próximos de zero.

Para as análises das soluções obtidas é utilizado um conjunto de indicadores que se entenderam os mais apropriados à análise estratégica da expansão de infraestruturas urbanas, nomeadamente: o número de novas áreas de expansão, densidades populacionais atribuídas,

características das infraestruturas após expansão como sejam por exemplo os comprimentos de rede nova, de rede reforçada e tempo de viagem na rede de transportes.

De acordo com as opções tomadas e anteriormente expostas, da realização do presente trabalho surge um conjunto de orientações/recomendações relativas às localizações das novas áreas de expansão, apresentadas no Subcapítulo 6.4. Esse conjunto de orientações que posteriormente será dado a conhecer aos planeadores urbanísticos, constitui uma ferramenta de apoio à decisão e fornece informação para o posterior traçado e dimensionamento de cada infraestrutura agora ao nível do projeto, concretizando-se efetivamente o objetivo principal da tese, como já havia sido dito.

Posto isto enumeram-se a seguir, as principais conclusões retiradas deste trabalho:

- o modelo de otimização desenvolvido, que contempla de forma integrada as três principais infraestruturas no âmbito da engenharia civil, permite considerar a interação daquelas infraestruturas à luz de diferentes objetivos, sendo este facto evidenciado na análise das soluções obtidas.
- o método escolhido para resolver o modelo de otimização representativo do problema em análise, o Recozimento Simulado, mostra-se capaz de lidar com a complexidade e a grande dimensão que caracteriza o problema, factos evidenciados logo pela demonstração da sua robustez e pela consideração do esforço computacional aceitável perante os cenários traçados;
- a cidade hipotética, uma componente significativa no âmbito do trabalho apresentado, permite numa primeira iteração, um maior controlo das suas características, dos cenários traçados e dos indicadores analisados. Verifica-se que existe uma relação satisfatória entre a caracterização da cidade e os resultados finais obtidos uma vez que, nas soluções resultantes

da aplicação da metodologia, o Índice de Aptidão, principal elemento utilizado na caracterização do território, se revelou de grande importância e influência na localização das novas áreas de expansão;

- por fim, pode-se afirmar que com as opções tomadas, nomeadamente as relativas à caracterização da cidade, construção dos cenários e escolha dos indicadores a serem analisados, o conjunto de ilações e recomendações que resultam da análise das soluções obtidas mostrou-se plausível, coerente e revelador da inter-relação entre as infraestruturas consideradas, no sentido de atingirem objetivos por vezes comuns e outras vezes conflituosos.

Com isto considera-se que, de uma forma geral, os objetivos da tese foram atingidos, servindo o trabalho desenvolvido de base para desenvolvimentos futuros, como é sugerido seguidamente.

7.2 Desenvolvimentos Futuros

O conjunto de medidas orientadoras que resulta de uma análise como a que se faz no presente trabalho, está sempre dependente, não só das características próprias de cada cidade, como dos cenários construídos e dos indicadores considerados para se fazerem as avaliações.

Nesta tese, o estudo de caso é feito com cidades hipotéticas mas toda a metodologia apresentada pode ser aplicada a uma cidade real. Os cenários construídos são os que se entendem mais pertinentes no contexto em questão, mas outros relativos a cada situação em particular podem ser considerados. O mesmo se passa em relação aos indicadores analisados.

No presente trabalho estes referem-se à localização das áreas de expansão, as respetivas densidades populacionais máximas, e às características das infraestruturas após expansão, mas, mais uma vez, outros poderiam ser escolhidos.

Portanto, tendo em conta os pressupostos anteriores, são apresentados e desenvolvidos a seguir alguns aspetos que em trabalhos futuros podem ser abordados no sentido de melhorar o trabalho já realizado.

Na construção da cidade hipotética tentou fazer-se uma abordagem e tratamento de todos os aspetos que caracterizam uma cidade real obtendo-se um modelo o mais verosímil possível capaz de traduzir, para a análise pretendida, a problemática do planeamento de infraestruturas vista de uma forma integrada.

Reconhece-se no entanto que, não esquecendo o equilíbrio necessário entre a semelhança com a realidade e a complexidade do modelo, outras opções podem sempre ser tomadas no sentido de o melhorar. Neste âmbito, um exemplo que pode ser dado e que pode ser trabalhado em desenvolvimentos futuros diz respeito ao traçado da rede de abastecimento de água. De facto, considerou-se por simplificação um traçado do tipo ramificado, embora se reconheça que teria sentido tratar aquela rede como uma rede malhada. Avaliar as repercussões deste procedimento e fazer a respetiva comparação com os resultados obtidos é um trabalho que se planeia realizar no futuro. Outro exemplo que pode ser dado no sentido de tornar o modelo mais realista seria o de considerar nas infraestruturas de abastecimento de água e drenagem de águas residuais as instalações de tratamento, a montante da distribuição e antes de as devolver ao meio recetor, respetivamente.

Por outro lado, as três infraestruturas consideradas neste estudo foram as que de certa forma estão ligadas à cidade existente, não só funcionalmente, como também estruturalmente. Isto é, a ampliação de qualquer uma das redes consideradas repercute-se fisicamente nas redes já existentes, pela sua substituição, reforço ou redimensionamento. Em trabalhos futuros poderão considerar outras infraestruturas, como por exemplo as redes de equipamentos coletivos

e avaliar o funcionamento conjunto no cumprimento de objetivos que, mais uma vez, se acreditam conflitantes.

Apesar de no presente trabalho, as cidades analisadas serem geradas aleatoriamente, o programa computacional permite a entrada de dados reais exigindo, para tal, a representação de uma cidade real através de um grafo com tudo o que isso implica em termos de esquematização e simplificação. Também as características físicas do terreno e todas as especificidades que possam existir na área em estudo e que podem condicionar as soluções do problema podem ser incluídas no algoritmo. Na perspectiva de uma futura utilização prática do programa, é importante que ele seja preparado para, de uma forma amigável para o utilizador, trabalhar com dados de cidades reais.

O método utilizado para resolução do problema em análise foi o método do Recozimento Simulado. No entanto, este é apenas um de entre múltiplos métodos heurísticos que poderiam ter sido escolhidos. No futuro, seria importante verificar se, utilizando outros métodos também heurísticos, nomeadamente os de pesquisa populacional como os Algoritmos Genéticos, seria possível obter melhores soluções. Por outro lado, o próprio método utilizado poderia ter sido implementado de outra forma, tanto ao nível da definição das vizinhanças da solução candidata como do processo de arrefecimento, com eventuais vantagens quanto ao valor das soluções. Este é um outro aspeto em que o trabalho descrito nesta tese pode ser melhorado.

Na presente tese não se faz a construção completa da Fronteira de Pareto para os problemas em análise. Trabalha-se, antes, em regiões específicas desta fronteira, pela escolha *a priori* de diferentes combinações de pesos afetas aos componentes da função objetivo. A escolha

específica daquelas combinações tem a ver com o facto de se ter a montante da resolução do problema uma ideia sobre quais os resultados e análises que mais importam aos decisores envolvidos nos problemas aqui tratados. No entanto, reconhece-se que poderia ser também útil aprofundar o trabalho de aproximação à Fronteira de Pareto, designadamente comparando nesta ótica os resultados que se obtêm recorrendo ao método do Recozimento Simulado e a Algoritmos Genéticos.

Para concluir, importa referir que, apesar dos objetivos traçados para esta tese terem sido globalmente atingidos, as considerações sobre desenvolvimentos futuros que aqui se deixam significam que o tema nela abordado está longe de estar esgotado, havendo diversos aspetos que subsistem para posterior investigação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aarts, E. H. L. and Korst, J. (1989). *Simulated Annealing and Boltzmann Machines: a Stochastic Approach to Combinatorial and Neural Computing*, John Wiley & Sons, England.
- Aarts, E. H. L. and Van Laarhoven, P. J. M. (1985). "Statistical cooling: a general approach to combinatorial optimization problems." *Philips Journal Research*, 40(4), 193-226.
- Antunes, C. H., Alves, M. J. e Clímaco, J. (2012). "Tomada de decisão em ambiente multiobjectivo." *Manual de Computação Evolutiva e Metaheurística*, Imprensa da Universidade de Coimbra, 323-356.
- Antunes, J. C. (2009). "Da Ruralidade e do Disperso Urbano." *Sociedade e Território*, 42.
- Bhave, P. R. (1985). "Optimal Expansion of Water Distribution Systems." *Journal of Environmental Engineering*, 111(2), 177-197.
- Blank, C. (2014). "Definition of Non-Basic Employment." Disponível em <<http://smallbusiness.chron.com/definition-nonbasic-employment-10231.html>>
- Carvalho, J. (2012). "Ordenamento do Território e Política de Habitação: que caminhos para Portugal?" *Revista Portuguesa de Estudos Regionais*, 32, 79-83.
- Cerny, V. (1985). "A Thermodynamical approach to the travelling salesman problem." *Journal of Optimization Theory and Applications*, 45(1), 41-51.
- Cervero, R. (2003). "Road Expansion, Urban Growth, and Induced Travel: A Path Analysis." *Journal of the American Planning Association*, 69(2), 145-163.
- Chang, N. B. and Hernandez, E. A. (2008). "Optimal Expansion Strategy for a Sewer System under Uncertainty." *Environmental Modeling & Assessment*, 13(1), 93-113.
- Cheung, P. B., Reis, L. F. R. and Carrijo, I. B. (2003a). "Multiobjective Optimization to the Rehabilitation of Water Distribution Network." *Advances in Water Supply Management: Proceedings of the CCWI '03 Conference*, London, chapter 34.

- Cheung, P. B., Reis, L. F. R., Formiga, K. T. M., Chaudhry, F. H. and Ticona, W. G. C. (2003b). "Multiobjective evolutionary algorithms applied to the rehabilitation of a water distribution system: a comparative study." *Proceedings of 2nd International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, Faro, Portugal, 662-676.
- Coello, C. C., Lamont, G. B. and Veldhuizen, D. V. (2007). *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*, Springer, US.
- Cohen, B. (1994) "Training synaptic delays in a recurrent neural network." M.S. thesis, Tel-Aviv University, Tel-Aviv, Israel.
- Cunha, M. C. (1999). "On solving aquifer management problems with simulated annealing algorithms." *Water Resources Management*, 13(3), 153-169.
- Cunha, M. S. and Sousa, J. (2001). "Hydraulic infrastructures design using simulated annealing." *Journal of Infrastructure Systems*, 7(1), 32-39.
- Cunha, M. C. and Sousa, J. (2010). "Robust design of water distribution networks for a proactive risk management." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2), 227-236.
- Dandy, G. C. and Engelhardt, M. O. (2001). "Optimum rehabilitation of water distribution system considering cost and reliability." *Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress*, Orlando, Florida, USA.
- Deb, K. (2001). *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, John Wiley & Sons, New York.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. and Meyarivan, T. (2002). "A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.

- Doerner, K., Gutjahr, W. J., Hartl, R. F., Strauss, C. and Stummer, C. (2006). "Pareto Ant Colony Optimization: A Metaheuristic Approach to Multiobjective Portfolio Selection." *European Journal of Operational Research*, 171(3), 830-841.
- Dougherty, D. E. and Marryott, R. A. (1991). "Optimal groundwater management, I, simulated annealing." *Water Resources Research*, 27(10), 2493-2508.
- Eglese, R. W. (1990). "Simulated annealing: a tool for operational research." *European Journal of Operational Research*, 46(3), 271-281.
- Ehrgott, M. and Gandibleux, A. (2004). "Approximative solution methods for multiobjective combinatorial optimization." *Top*, 12(1), 1-63.
- Farmani, R., Savic, D. A. and Walters, G. A. (2005). "Evolutionary multi-objective optimization in water distribution network design." *Engineering Optimization*, 37(2), 167-183.
- Fonseca, C. M. and Fleming, G. J. (1993). "Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization." *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms*, Illinois, USA, 416-423.
- Fragoso, T. M. (2003). "Planeamento e Gestão de Sistemas Aquíferos – Aplicação a um Aquífero Português." Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Chankong, V., Haimes, Y. and Gemperline, D. (1981). "A Multiobjective Dynamic Programming Method for Capacity Expansion." *IEEE Transactions on Automatic Control*, 26(5), 1195-1207.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Westey, USA.
- Hajek, B. (1988). "Cooling Schedules for Optimal Annealing." *Mathematics of Operations Research*, 13(2), 311-329.

- Hellstrom, D., Jeppsson, U. and Karrman E. (2000). "A framework for systems analysis of sustainable urban water management." *Environmental Impact Assessment Review*, 20(3), 311-321.
- Hertz, A., Jaumard, B., Ibeiro, C. C. and Franco Filho, W. P. (1994). "A multi-criteria tabu search approach to cell formation problems in group technology with multiple objectives." *Operations Research*, 28(3), 303-328.
- Horn, J., Nafpliotis, N. and Goldberg, D. E. (1994). "A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization." *Proceedings of the 1st IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence*, Orlando, Florida, USA, 1, 82-87.
- Huang, M. D., Romeo, F. and Sangiovanni-Vincentelli, A. (1986). "An efficient general cooling schedule for simulated annealing." *Proceedings of IEEE International Conference on Computer-Aided Design*, Santa Clara, CA, 381-384.
- Ingberg, L. (1996). "Adaptative simulated annealing (ASA): lessons learned." *Control and Cybernetics Journal*, 25, 33-54.
- Jajac, N., Knezic, S. and Mavoric, I. (2009). "Decision support system to urban infrastructure maintenance management." *Organization, Technology and Management in Construction: An International Journal*, 1(2), 72-79.
- Jaszkiwicz, A. (2001). "Comparison of local search-based metaheuristics on the multiple objective knapsack problem." *Foundations of Computer and Decision Sciences*, 26(1), 99-120.
- Jin, X., Zhang, J., Gao, J. L. and Wu, W. Y. (2008). "Multi-objective optimization of water supply network rehabilitation with non-dominated sorting Genetic Algorithm-II." *Journal of Zhejiang University-Science A*, 9(3), 391-400.
- Johnson, D., Aragon, C., McGeoch, L. and Schevon, C. (1989). "Optimization by simulated annealing: an experimental evaluation; part I, Graph partitioning." *Operation Research*, 37(6), 865-892.

- Kirkpatrick, S. (1984). "Optimization by simulated annealing: quantitative studies." *Statistical Physics*, 34(5-6), 975-986.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. and Vecchi, M. (1983). "Optimization by simulated annealing." *Science*, 220(4598), 671-680.
- Kozlowski, J.M. (1986). *Threshold Approach in Urban, Regional, and Environmental Planning: Theory & Practice*, University of Queensland Press, Brisbane, Australia.
- Lee, K. and Mastny, L. (2008). "World Is Soon Half Urban." *Vital Signs 2007-2008*, 53-54.
- Lim, S. R., Suh, S., Kim J. H. and Park, H. S. (2010). "Urban water infrastructure optimization to reduce environmental impacts and costs." *Journal of Environmental Management*, 91(3), 630-637.
- Lundy, M. and Mees, A. (1986). "Convergence of an annealing algorithm." *Mathematical Programming*, 34(1), 111-124.
- Malisz, B. (1972). "Threshold Analysis as a Tool in Urban And Regional Planning." *Papers in Regional Science*, 29 (1), 167-177.
- Marler, R. T. and Arora, J. S. (2004). "Survey of multi-objective optimization Methods for engineering." *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(6), 369-395.
- Marques, J. C. (2013). "Robust design of water distribution networks for a proactive risk and uncertainty management." Tese de Doutorado, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Marques, A. e Sousa, J. (2006). *Hidráulica Urbana Sistemas de Abastecimento de Água*, Imprensa da Universidade Coimbra, Coimbra.
- Marryott, R. A., Dougherty, D. E. and Stollar, R.L. (1993). "Optimal groundwater management, 2. Application of simulated annealing to a field-scale contaminated site." *Water Resources Research*, 29(4), 847-860.
- Marull, J., Pino, J., Mallarach, J. M. and Cordobilla, M.J. (2007). "A Land Suitability Index for Strategic Environmental Assessment in metropolitan areas." *Landscape and Urban Planning*, 81(3), 200-212.

- Metropolis, N., Rosenbluth, M., Rosenbluth, A., Teller, A. and Teller, E. (1953). "Equations of state calculations by fast computing machines." *Journal of Chemical Physics*, 21(6), 1087-1092.
- Mitra, D., Romeo, F. and Sangiovanni-Vincentelli, A. (1985). "Convergence and finite-time behavior of simulated annealing." *Proceedings of the 24th IEEE Conference Decision and Control*, Fort Lauderdale, Florida, 761-767.
- Oliveira, F. P. (2004). "Os caminhos a "direito" para um urbanismo operativo." *RevCEDOUA Revista do Centro de Estudos de Direito do Ordenamento, do Urbanismo e do Ambiente*, 7(14), 2-30.
- Ong, S. L. and Adams, B. J. (1990). "Capacity Expansion for Regional Wastewater Systems." *Journal of Environmental Engineering*, 116(3), 542-560.
- Pareto, V. (1896). *Cours d'Economie Politique*, Rouge, Lausanne, Switzerland.
- Qiu, D. and Zhang, J. (2011). "Urban residential land suitability index system and its comprehensive evaluation - A case study of Wenzhou." *Procedia Engineering*, 21, 439-445.
- Rasoolimanesh, S. M., Badarulzaman, N. and Jaafar, M. (2012). "City Development Strategies (CDS) and Sustainable Urbanization in Developing World." *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 36, 623-631.
- Reeves, C. R. (1993). *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*, Blackwell Scientific Publishing, Oxford, England.
- Rodrigues, J. C., Simão, A. and Antunes, C. H. (2011). "A GIS-based multicriteria spatial decision support system for planning urban infrastructures." *Decision Support Systems*, 51(3), 720-726.
- Rodrigues, J. M. C. (1999). *Aplicações da Teoria de Sistemas*, Ediliber Editora, Coimbra.
- Sahely, H. R., Kennedy, C. A. and Adams, B. J. (2005). "Developing sustainability criteria for urban infrastructure systems." *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(1), 72-85.

- Santos, L. M. M (1985). *A Extensão da Análise dos Limiares ao Ordenamento Sub-Regional e Regional*. Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Schaffer, J. D. (1984). "Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms." Ph.D. thesis, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, USA.
- Serafini, P. (1992). "Simulated annealing for multiobjective optimization problems." *Proceedings of the 10th International Conference on Multiple Criteria Decision Making*, Taipei, Taiwan, 87-96.
- Sousa, J. J. (2006). "Modelos de Apoio à Decisão para o Dimensionamento e a Operação de Sistemas de Abastecimento de Água." Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Sousa, J., Ribeiro, A., Cunha, M. C. and Antunes, A. (2002). "An optimization approach to wastewater systems planning at regional level." *Journal of Hydroinformatics*, 4(2), 115-123.
- Srinivas, N. and Deb, K. (1994). "Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms." *Evolutionary Computation*, 2(3), 221-248.
- Swamee, P. K. and Sharma, A. K. (1990). "Reorganization of Water Distribution System." *Journal of Environmental Engineering*, 116(3), 588-600.
- Tuytens, D., Teghem, J. and El-Sherbeny, N. (2003). "A particular multiobjective vehicle routing problema solved by simulated annealing." *Metaheuristics for Multiobjective Optimization*, 535, 133-152.
- Ulungu, E. L., Teghem, J., Fortemps, P. H. and Tuytens D. (1999). "MOSA Method: A Tool for Solving Multiobjective Combinatorial Optimization Problems." *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 8(4), 221-236.
- Veldhuizen, D. V. and Lamont, G. B. (2000). "Multi-objective evolutionary algorithms: analyzing the state-of-the-art." *Evolutionary Computation*, 8(2), 125-147.

- Yuan, X. H., Chen, X. J. H., Chen, B. and Chen, G. Q. (2008). “Urban dynamics and multiple-objective programming: A case study of Beijing.” *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 13(9), 1998-2017.
- Zeferino, J. A. (2011). “Optimization models for wastewater systems planning at regional level: deterministic and robust approaches.” Tese de Doutorado, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Zeferino, J. A., Antunes A. P. and Cunha M. C. (2009). “An Efficient Simulated Annealing Algorithm for Regional Wastewater System Planning.” *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24(5), 359-370.
- Zitzler, E. and Thiele, L. (1999). “Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach.” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3(4), 257-271.
- Zitzler, E., Laumanns, M., Thiele, L. Fonseca, C. and Fonseca, V. (2003). “Performance assessment of multiobjective optimizers: An analysis and review.” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 7(2), 117–132.

ANEXO A

CIDADE EXISTENTE

População Total: 150000 habitantes;

Área da cidade existente: 5772 ha;

Área do domínio de expansão: 9828 ha;

Densidade Populacional: 50.0 hab/ha;

Percentagem de Centróides Centrais: 15.0 %;

Percentagem de Centróides Industriais: 10.0 %;

Percentagem de Centróides Comerciais de Grande Distribuição: 10.0 %;

Emprego Total: 40.0 % da População Total;

Emprego Não Básico: 32680;

Emprego Básico: 114819.

CARACTERIZAÇÃO DOS CENTRÓIDES DA CIDADE EXISTENTE

Centróide ID	X(m)	Y(m)	Z(m)	Tipo	População	Emprego	Emp. B.	Emp. NB.	Indúst.	Come. Grde. Dist.	Come. Serv.
1	6413	3655	169.6	Residencial	6068	1214	0	1214	0	0	0
2	4186	7131	285.5	Central	2090	12674	11838	836	0	0	11838
3	6939	6991	189.0	Central	3593	9871	8434	1437	0	0	8434
4	8295	4202	244.6	Residencial	14444	2889	0	2889	0	0	0
5	8276	7187	175.5	Residencial	7573	1515	0	1515	0	0	0
6	8752	8744	200.8	Residencial	5090	1018	0	1018	0	0	0
7	7174	5070	219.0	Residencial	8489	1698	0	1698	0	0	0
8	3851	9413	243.0	Residencial	2782	3038	2482	556	0	0	0
9	6454	8692	191.7	Residencial	4107	821	0	821	0	0	0
10	4903	6171	263.5	Central	2521	9639	8631	1008	0	0	8631
11	9000	6195	226.8	Residencial	13746	2749	0	2749	0	0	0
12	7994	9709	248.7	Residencial	3971	794	0	794	0	0	0
13	3265	6157	277.0	Residencial	3166	633	0	633	0	0	0
14	3046	4696	214.1	Residencial	3127	625	0	625	0	0	0
15	4077	3632	185.4	Residencial	3631	726	0	726	0	0	0
16	7422	3302	206.2	Residencial	7762	1552	0	1552	0	0	0
17	5265	8883	236.0	Residencial	3447	689	0	689	0	0	0
18	5234	7757	250.0	Central	2339	8884	7948	936	0	0	7948

19	6029	5229	198.1	Residencial	5731	1146	0	1146	0	0	0
20	7886	6040	228.2	Residencial	9840	1968	0	1968	0	0	0
21	4271	5193	240.1	Residencial	3842	768	0	768	0	0	0
22	5062	4237	190.8	Residencial	4491	898	0	898	0	0	0
23	7726	8124	168.4	Residencial	5396	1079	0	1079	0	0	0
24	3217	7716	275.1	Residencial	2923	3420	2835	585	0	0	0
25	5862	6941	220.1	Central	2868	7512	6365	1147	0	0	6365
26	5961	9610	217.1	Residencial	3402	680	0	680	0	0	0
27	4198	8404	252.9	Residencial	3160	3540	2908	632	0	0	0
28	3014	3473	180.6	Residencial	3048	610	0	610	0	0	0
29	3126	8715	233.3	Residencial	2710	2407	1865	542	0	0	0
30	5447	3295	163.6	Residencial	4643	929	0	929	0	0	0
31	9572	8028	198.9	Comercial	0	10735	10735	0	0	10735	0
32	9421	3724	228.6	Comercial	0	9164	9164	0	0	9164	0
33	8367	2647	178.8	Comercial	0	9781	9781	0	0	9781	0
34	2593	10226	183.7	Industrial	0	11385	11385	0	11385	0	0
35	9132	9801	229.4	Industrial	0	11642	11642	0	11642	0	0
36	9562	4823	242.3	Industrial	0	8806	8806	0	8806	0	0
soma					150000	147499	1E+05	32680	31833	29680	43216

CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM DE ÁGUAS RESIDUAIS DA CIDADE EXISTENTE

Coletor ID	População	Q_D (l/s)	D_d (mm)
0	6675	35.5	200
1	4518	26.8	200
2	8470	42.6	250
3	14774	66.9	315
4	21449	92.2	315
5	0	5.5	200
6	3353	27.5	200
7	19532	90.5	315
8	36300	152.9	400
9	59609	238.3	500
10	81058	316.2	630
11	115694	441.1	710
12	149879	563.7	800
13	2299	17.5	200
14	3476	22.5	200

15	5775	31.9	200
16	8548	42.9	250
17	12774	59.3	250
18	16768	74.5	315
19	3952	24.5	200
20	15888	71.2	315
21	4368	26.2	200
22	9967	48.4	250
23	18297	80.3	315
24	34186	139.6	400
25	8330	42.0	250
26	5599	31.2	200
27	9338	46.0	250
28	5936	32.5	200
29	16760	74.5	315
30	26098	109.6	400
31	34636	141.3	400
32	3060	20.7	200
33	3060	20.7	200
34	6041	33.0	200
35	9257	45.7	250
36	12739	59.1	250
37	16179	72.3	315
38	4518	26.8	200
39	2773	19.5	200
40	15121	68.3	315
41	0	5.5	200
42	0	5.5	200
43	15121	79.3	315
44	15121	84.8	315
45	15121	90.3	315
46	15121	68.3	315
47	4368	26.2	200
48	3483	22.5	200
49	3440	22.3	200
50	3994	24.6	200
51	8538	42.8	250
52	3792	23.8	200
53	3742	23.6	200
54	7534	38.9	200
55	10107	49.0	250

56	13262	61.1	250
57	18202	79.9	315
58	23309	99.2	315
59	2573	18.7	200
60	6304	34.0	200
61	10824	51.8	250
62	4226	25.6	200
63	4940	28.5	200
64	5936	32.5	200
65	3215	21.4	200
66	3155	21.1	200
67	3742	23.6	200
68	3476	22.5	200
69	3353	22.0	200
70	2981	20.4	200
71	5107	29.2	200
72	0	5.5	200
73	0	5.5	200
74	0	5.5	200
75	0	5.5	200
76	0	5.5	200
77	0	5.5	200
78	0	5.5	200
79	0	5.5	200

CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DA CIDADE EXISTENTE

Conduta ID	População	Q_A (l/s)	D_a (mm)
0	6675	38.8	250
1	6675	38.8	250
2	12979	69.3	315
3	15121	91.4	400
4	40976	212.2	500
5	49306	249.3	500
6	83942	401.7	630
7	87894	419.0	630
8	105391	495.2	710
9	108546	508.9	710
10	128700	596.2	710
11	143169	658.7	800

12	145468	668.6	800
13	165000	755.7	800
14	2299	16.1	160
15	3952	25.0	200
16	15888	83.0	315
17	0	3.0	160
18	15888	86.0	315
19	8330	47.0	250
20	5599	33.4	250
21	4368	27.2	200
22	9967	54.9	315
23	9338	51.9	315
24	8538	48.0	250
25	17876	92.3	400
26	28700	141.9	400
27	3060	20.3	200
28	3060	20.3	200
29	6041	35.7	250
30	9257	51.5	315
31	0	3.0	160
32	19532	103.0	400
33	4518	27.9	200
34	4518	27.9	200
35	2773	18.7	200
36	3994	25.2	200
37	8220	46.5	250
38	10993	59.9	315
39	15121	79.4	315
40	0	3.0	160
41	0	6.0	160
42	15121	85.4	315
43	4368	27.2	200
44	3483	22.5	200
45	3353	21.8	200
46	6793	39.4	250
47	10275	56.4	315
48	3440	22.3	200
49	3994	25.2	200
50	8538	48.0	250
51	3792	24.1	200
52	3742	23.9	200

53	7534	43.1	250
54	10107	55.6	315
55	2573	17.6	200
56	6304	37.0	250
57	10824	59.1	315
58	4226	26.4	200
59	4940	30.1	250
60	5107	30.9	250
61	10047	55.3	315
62	5936	35.1	250
63	5936	35.1	250
64	3215	21.1	200
65	3155	20.8	200
66	3742	23.9	200
67	3476	22.5	200
68	3476	22.5	200
69	3353	21.8	200
70	2981	19.8	200
71	5107	30.9	250
72	0	3.0	160
73	0	3.0	160
74	0	6.0	160
75	0	3.0	160
76	0	3.0	160
77	0	3.0	160
78	0	3.0	160
79	0	3.0	160
80	0	3.0	160

CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE TRANSPORTES DA CIDADE EXISTENTE

Eixo ID	Comp. (m)	V (VLE/h)	TV (s)
0 1	72	1733	28.46
0 2	72	710	8.94
1 1	126	1093	25.80
1 2	126	5403	419.52
2 1	14	1720	5.62
2 2	14	6709	71.33
3 1	189	6603	816.14
3 2	189	1367	15.47
4 1	182	3771	325.07

4 2	182	984	35.18
5 1	246	2406	180.81
5 2	246	367	21.79
6 1	65	3684	111.03
6 2	65	1241	17.03
7 1	361	1131	80.96
7 2	361	774	52.27
8 1	31	1866	12.88
8 2	31	373	2.43
9 1	167	1340	45.67
9 2	167	4969	474.96
10 1	191	5653	444.92
10 2	191	1365	15.46
11 1	288	1360	85.58
11 2	288	225	23.74
12 1	153	1306	40.32
12 2	153	202	11.70
13 1	309	591	35.55
13 2	309	186	24.24
14 1	369	606	44.07
14 2	369	271	31.21
15 1	70	2812	66.78
15 2	70	784	9.80
16 1	107	1760	46.72
16 2	107	278	8.97
17 1	241	1444	76.64
17 2	241	4357	551.91
18 1	224	2680	207.78
18 2	224	734	31.31
19 1	36	4865	75.96
19 2	36	1454	8.61
20 1	188	1556	66.96
20 2	188	349	16.66
21 1	236	1277	63.86
21 2	236	479	24.45
22 1	126	2584	102.90
22 2	126	593	13.95
23 1	273	1420	87.16
23 2	273	1009	54.41
24 1	64	1898	26.52
24 2	64	4290	119.03

25 1	387	1060	79.91
25 2	387	225	31.29
26 1	289	1839	138.25
26 2	289	1326	82.44
27 1	473	314	41.55
27 2	473	147	37.22
28 1	275	1202	68.41
28 2	275	614	33.37
29 1	44	927	7.03
29 2	44	427	3.85
30 1	30	0	2.00
30 2	30	4259	58.68
31 1	79	0	6.00
31 2	79	4259	176.05
32 1	72	0	5.00
32 2	72	3669	110.17
33 1	117	0	9.00
33 2	117	3734	205.07
34 1	353	0	27.00
34 2	353	3734	615.21
35 1	93	0	7.00
35 2	93	1354	27.05
36 1	229	0	17.00
36 2	229	1354	65.70
37 1	196	0	15.00
37 2	196	2936	217.03
38 1	69	0	5.00
38 2	69	4337	151.95
39 1	361	20	27.02
39 2	361	1052	73.68
40 1	648	1904	326.44
40 2	648	0	49.00
41 1	490	1011	96.06
41 2	490	106	37.65
42 1	502	242	41.49
42 2	502	472	51.25
43 1	1007	142	79.41
43 2	1007	261	85.22
44 1	524	512	56.38
44 2	524	161	41.62
45 1	470	101	36.57

45 2	470	584	55.21
46 1	1004	25	77.08
46 2	1004	317	89.06
47 1	997	23	76.06
47 2	997	396	94.64
48 1	990	0	76.00
48 2	990	626	122.57
49 1	741	2217	98.49
49 2	741	47	57.00
50 1	268	1479	22.88
50 2	268	1348	21.99
51 1	992	937	77.77
51 2	992	709	76.58
52 1	1007	846	78.19
52 2	1007	996	79.28
53 1	994	761	76.77
53 2	994	1137	79.83
54 1	226	1410	19.03
54 2	226	893	17.33
55 1	778	474	59.09
55 2	778	1439	66.62
56 1	997	584	76.27
56 2	997	1129	79.72
57 1	364	705	28.21
57 2	364	943	28.67
58 1	626	156	48.00
58 2	626	981	49.34
59 1	1009	1500	347.84
59 2	1009	5	77.00
60 1	758	1121	171.96
60 2	758	314	66.93
61 1	234	375	21.96
61 2	234	1559	86.34
62 1	1007	269	85.72
62 2	1007	922	179.34
63 1	994	307	87.21
63 2	994	1234	256.69
64 1	257	929	44.61
64 2	257	2858	261.52
65 1	747	1571	276.77
65 2	747	587	87.70

66 1	997	836	158.93
66 2	997	391	94.15
67 1	990	215	81.49
67 2	990	141	78.35
68 1	1009	896	78.50
68 2	1009	385	77.05
69 1	208	2649	39.74
69 2	208	2052	24.54
70 1	784	460	60.08
70 2	784	2650	149.21
71 1	553	648	42.22
71 2	553	3894	333.11
72 1	454	3427	175.41
72 2	454	1684	42.25
73 1	623	1078	48.91
73 2	623	3067	172.35
74 1	371	2417	56.82
74 2	371	2014	41.89
75 1	1004	959	78.96
75 2	1004	1639	93.75
76 1	301	1235	24.61
76 2	301	3112	88.04
77 1	696	2716	139.90
77 2	696	283	53.01
78 1	990	989	78.19
78 2	990	70	76.00
79 1	493	2833	108.79
79 2	493	37	37.00
80 1	516	1516	45.21
80 2	516	3009	135.31
81 1	598	2522	102.06
81 2	598	1571	54.44
82 1	394	728	30.25
82 2	394	3188	123.42
83 1	1007	357	77.04
83 2	1007	2366	149.71
84 1	994	302	76.02
84 2	994	2286	138.52
85 1	588	569	45.14
85 2	588	2846	133.98
86 1	416	2326	60.22

86 2	416	974	32.87
87 1	997	1223	81.12
87 2	997	292	76.02
88 1	225	1268	18.32
88 2	225	238	17.00
89 1	765	198	58.00
89 2	765	272	58.01
90 1	1009	3034	273.70
90 2	1009	37	77.00
91 1	992	2279	137.84
91 2	992	1215	80.99
92 1	318	2830	70.38
92 2	318	1310	26.13
93 1	689	1298	57.53
93 2	689	2221	91.90
94 1	456	1904	48.85
94 2	456	1352	38.52
95 1	538	665	41.24
95 2	538	2059	63.20
96 1	1004	580	77.26
96 2	1004	1089	80.26
97 1	216	1153	16.85
97 2	216	746	16.15
98 1	781	270	60.01
98 2	781	1071	62.38
99 1	444	355	34.02
99 2	444	466	34.05
100 1	546	29	42.00
100 2	546	544	42.11
101 1	1009	2068	591.72
101 2	1009	0	77.00
102 1	992	1380	302.30
102 2	992	501	105.85
103 1	1007	677	132.13
103 2	1007	459	102.37
104 1	994	555	112.52
104 2	994	329	88.86
105 1	429	767	63.34
105 2	429	374	40.19
106 1	575	237	47.86
106 2	575	642	72.30

107 1	410	351	36.95
107 2	410	384	38.14
108 1	587	70	45.35
108 2	587	439	58.53
109 1	990	2	76.00
109 2	990	161	79.06
110 1	1009	1415	317.92
110 2	1009	155	79.88
111 1	992	1939	522.64
111 2	992	0	76.00
112 1	1007	799	153.75
112 2	1007	338	90.78
113 1	994	384	93.50
113 2	994	187	80.17
114 1	1004	88	77.94
114 2	1004	152	79.77
115 1	997	84	76.84
115 2	997	127	77.90
116 1	476	203	38.32
116 2	476	183	37.88
117 1	514	4	39.00
117 2	514	151	40.38
118 1	1007	1052	210.13
118 2	1007	20	77.05
119 1	992	101	77.22
119 2	992	1238	258.12
120 1	993	1633	392.70
120 2	993	6	76.00
121 1	1001	1280	274.00
121 2	1001	164	80.24
122 1	999	0	76.00
122 2	999	1680	411.13
123 1	182	0	14.00
123 2	182	4677	492.56
124 1	822	705	111.97
124 2	822	1046	170.62
125 1	277	134	21.59
125 2	277	2543	233.19
126 1	724	1415	227.09
126 2	724	155	57.06
127 1	1007	1298	83.59

127 2	1007	299	77.02
128 1	992	1633	92.30
128 2	992	733	76.66
129 1	993	2433	156.24
129 2	993	845	77.17
130 1	1001	3039	274.94
130 2	1001	1536	89.93
131 1	999	1649	92.92
131 2	999	2590	179.01
132 1	803	2979	205.89
132 2	803	1988	89.70
133 1	201	368	15.01
133 2	201	4612	219.63
134 1	1001	21	77.00
134 2	1001	3076	284.73
135 1	1007	101	78.22
135 2	1007	211	82.36
136 1	992	529	109.23
136 2	992	261	84.11
137 1	993	575	115.21
137 2	993	837	159.24
138 1	1001	1351	296.75
138 2	1001	558	114.45
139 1	999	918	176.12
139 2	999	576	115.40
140 1	1004	580	117.53
140 2	1004	693	134.75
141 1	699	1208	173.78
141 2	699	659	88.95
142 1	302	183	24.21
142 2	302	1662	122.31
143 1	1007	151	77.00
143 2	1007	622	77.35
144 1	298	1141	23.12
144 2	298	1385	24.44
145 1	694	503	53.10
145 2	694	2239	93.17
146 1	993	1051	78.79
146 2	993	2514	167.55
147 1	1001	3228	329.13
147 2	1001	960	78.97

148 1	999	2814	219.57
148 2	999	571	76.24
149 1	1004	1584	91.61
149 2	1004	817	78.03
150 1	346	1429	29.27
150 2	346	670	26.16
151 1	655	380	50.03
151 2	655	644	50.26
152 1	1007	111	78.47
152 2	1007	303	88.06
153 1	992	141	78.35
153 2	992	1227	254.89
154 1	993	884	168.72
154 2	993	967	187.13
155 1	1001	1580	377.32
155 2	1001	581	117.55
156 1	999	1402	309.52
156 2	999	109	77.40
157 1	1004	573	116.55
157 2	1004	165	80.28
158 1	706	554	79.87
158 2	706	314	62.30
159 1	295	148	22.75
159 2	295	408	27.71
160 1	1007	215	82.55
160 2	1007	133	79.14
161 1	586	642	74.00
161 2	586	980	112.53
162 1	406	599	48.40
162 2	406	1450	132.85
163 1	993	872	166.20
163 2	993	1183	242.28
164 1	1001	1448	329.15
164 2	1001	562	114.97
165 1	999	1400	308.80
165 2	999	93	77.02
166 1	1004	574	116.60
166 2	1004	182	80.97
167 1	1001	68	77.56
167 2	1001	48	77.27
168 1	584	357	52.78

168 2	584	104	44.74
169 1	423	721	57.97
169 2	423	824	65.98
170 1	992	407	95.70
170 2	992	819	155.61
171 1	282	866	45.62
171 2	282	907	48.01
172 1	711	663	91.11
172 2	711	1115	158.94
173 1	1001	1337	292.12
173 2	1001	275	86.12
174 1	999	1128	227.10
174 2	999	166	79.26
175 1	1004	367	93.23
175 2	1004	95	78.08
176 1	1001	154	79.87
176 2	1001	92	78.01
177 1	1007	728	140.72
177 2	1007	0	77.00
178 1	992	403	95.33
178 2	992	501	105.82
179 1	993	476	102.89
179 2	993	499	105.59
180 1	1001	1015	201.02
180 2	1001	120	78.74
181 1	999	842	160.25
181 2	999	21	76.05
182 1	1004	311	88.65
182 2	1004	6	77.00
183 1	1001	151	79.73
183 2	1001	4	77.00

Notas:

- quando o eixo é vertical, o índice 1 indica sentido ascendente, o índice 2 indica sentido descendente;
- quando o eixo é horizontal, o índice 1 indica sentido para a direita, o índice 2 indica sentido para a esquerda.

SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO DAS 10 EXECUÇÕES

Cidade média;

Crescimento populacional de 30%;

Três densidades permitidas na expansão (75 hab/ha; 50 hab/ha; 25 hab/ha);

Combinação de pesos 1;

$a=0.6$; $r=0.6$; $n_1=90$; $n_2=10$.

CARACTERIZAÇÃO DOS NOVOS CENTRÓIDES QUE CONSTITUEM A SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Centróide ID	X(m)	Y(m)	Z(m)	Tipo	População	Emprego	Emp. B.	Emp. NB.	Indúst.	Comer. Grde. Dist.	Comer. Serv.
37	2500	500	75.4	Residencial	7500	1500	0	1500	0	0	0
38	1500	500	57.6	Residencial	7500	1500	0	1500	0	0	0
39	2500	1500	102.0	Residencial	7500	1500	0	1500	0	0	0
40	2500	2500	152.5	Residencial	7500	1500	0	1500	0	0	0
41	1500	2500	133.8	Residencial	7500	1500	0	1500	0	0	0
42	500	2500	124.7	Residencial	7500	1500	0	1500	0	0	0

Centróide ID	Avaliação do Índice de Aptidão				Densidade populacional (hab/ha)
	Inclinação	Exposição solar	Permeabilidade	Final	
37	ideal	boa	0	3	75
38	fraca	boa	0	3	75
39	ideal	boa	0	3	75
40	ideal	boa	0	3	75
41	ideal	boa	0	3	75
42	ideal	boa	0	3	75

CARACTERIZAÇÃO DOS CENTRÓIDES DA CIDADE EXISTENTE APÓS EXPANSÃO

Centróides ID	X(m)	Y(m)	Z(m)	Tipo	População	Emprego	Emp. B.	Emp. NB.	Indúst.	Comer. Grde. Dist.	Comer. Serv.
1	6413	3655	169.6	Residencial	6068	1214	0	1214	0	0	0
2	4186	7131	285.5	Central	2090	13492	12656	836	0	0	12656
3	6939	6991	189.0	Central	3593	10689	9252	1437	0	0	9252

4	8295	4202	244.6	Residencial	14444	2889	0	2889	0	0	0
5	8276	7187	175.5	Residencial	7573	1515	0	1515	0	0	0
6	8752	8744	200.8	Residencial	5090	1018	0	1018	0	0	0
7	7174	5070	219.0	Residencial	8489	1698	0	1698	0	0	0
8	3851	9413	243.0	Residencial	2782	3038	2482	556	0	0	0
9	6454	8692	191.7	Residencial	4107	821	0	821	0	0	0
10	4903	6171	263.5	Central	2521	10457	9449	1008	0	0	9449
11	9000	6195	226.8	Residencial	13746	2749	0	2749	0	0	0
12	7994	9709	248.7	Residencial	3971	794	0	794	0	0	0
13	3265	6157	277.0	Residencial	3166	633	0	633	0	0	0
14	3046	4696	214.1	Residencial	3127	625	0	625	0	0	0
15	4077	3632	185.4	Residencial	3631	726	0	726	0	0	0
16	7422	3302	206.2	Residencial	7762	1552	0	1552	0	0	0
17	5265	8883	236.0	Residencial	3447	689	0	689	0	0	0
18	5234	7757	250.0	Central	2339	9702	8766	936	0	0	8766
19	6029	5229	198.1	Residencial	5731	1146	0	1146	0	0	0
20	7886	6040	228.2	Residencial	9840	1968	0	1968	0	0	0
21	4271	5193	240.1	Residencial	3842	768	0	768	0	0	0
22	5062	4237	190.8	Residencial	4491	898	0	898	0	0	0
23	7726	8124	168.4	Residencial	5396	1079	0	1079	0	0	0
24	3217	7716	275.1	Residencial	2923	3420	2835	585	0	0	0
25	5862	6941	220.1	Central	2868	8330	7183	1147	0	0	7183
26	5961	9610	217.1	Residencial	3402	680	0	680	0	0	0
27	4198	8404	252.9	Residencial	3160	3540	2908	632	0	0	0
28	3014	3473	180.6	Residencial	3048	610	0	610	0	0	0
29	3126	8715	233.3	Residencial	2710	2407	1865	542	0	0	0
30	5447	3295	163.6	Residencial	4643	929	0	929	0	0	0
31	9572	8028	198.9	Commercial	0	11553	11553	0	0	11553	0
32	9421	3724	228.6	Commercial	0	9982	9982	0	0	9982	0
33	8367	2647	178.8	Commercial	0	10599	10599	0	0	10599	0
34	2593	10226	183.7	Industrial	0	12203	12203	0	12203	0	0
35	9132	9801	229.4	Industrial	0	12460	12460	0	12460	0	0
36	9562	4823	242.3	Industrial	0	9624	9624	0	9624	0	0

CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM DE ÁGUAS RESIDUAIS - SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Coletor ID	População	Q_D (l/s)		D_d (mm)	
		Inicial	Final	Inicial	Final
0	6675	35.5	35.5	200	200
1	4518	26.8	26.8	200	200

10	130558	316.2	488.9	630	710
11	165194	441.1	613	710	800
12	199379	563.7	735	800	1000
13	2299	17.5	17.5	200	200
14	3476	22.5	22.5	200	200
15	5775	31.9	31.9	200	200
16	8548	42.9	42.9	250	250
17	12774	59.3	59.3	250	250
18	16768	74.5	74.5	315	315
19	3952	24.5	24.5	200	200
2	8470	42.6	42.6	250	250
20	15888	71.2	71.2	315	315
21	4368	26.2	26.2	200	200
22	9967	48.4	48.4	250	250
23	18297	80.3	80.3	315	315
24	34186	139.6	139.6	400	400
25	8330	42.0	42.0	250	250
26	5599	31.2	31.2	200	200
27	9338	46.0	46.0	250	250
28	5936	32.5	32.5	200	200
29	16760	74.5	74.5	315	315
3	14774	66.9	66.9	315	315
30	26098	109.6	109.6	400	400
31	34636	141.3	141.3	400	400
32	3060	20.7	20.7	200	200
33	3060	20.7	20.7	200	200
34	6041	33.0	33.0	200	200
35	9257	45.7	45.7	250	250
36	12739	59.1	59.1	250	250
37	16179	72.3	72.3	315	315
38	4518	26.8	26.8	200	200
39	2773	19.5	19.5	200	200
4	21449	92.2	92.2	315	315
40	15121	68.3	68.3	315	315
41	0	5.5	5.5	200	200
42	0	5.5	5.5	200	200
43	15121	79.3	79.3	315	315
44	15121	84.8	84.8	315	315
45	15121	90.3	90.3	315	315
46	15121	68.3	68.3	315	315
47	4368	26.2	26.2	200	200

48	3483	22.5	22.5	200	200
49	3440	22.3	22.3	200	200
5	49500	5.5	195.9	200	500
50	3994	24.6	24.6	200	200
51	8538	42.8	42.8	250	250
52	3792	23.8	23.8	200	200
53	3742	23.6	23.6	200	200
54	7534	38.9	38.9	200	200
55	10107	49.0	49.0	250	250
56	13262	61.1	61.1	250	250
57	18202	79.9	79.9	315	315
58	23309	99.2	99.2	315	315
59	2573	18.7	18.7	200	200
6	52853	27.5	208.2	200	500
60	6304	34.0	34.0	200	200
61	10824	51.8	51.8	250	250
62	4226	25.6	25.6	200	200
63	4940	28.5	28.5	200	200
64	5936	32.5	32.5	200	200
65	3215	21.4	21.4	200	200
66	3155	21.1	21.1	200	200
67	3742	23.6	23.6	200	200
68	3476	22.5	22.5	200	200
69	3353	22.0	22.0	200	200
7	69032	90.5	267.1	315	630
70	2981	20.4	20.4	200	200
71	5107	29.2	29.2	200	200
72	0	5.5	5.5	200	200
73	0	5.5	5.5	200	200
74	0	5.5	5.5	200	200
75	0	5.5	5.5	200	200
76	0	5.5	5.5	200	200
77	0	5.5	5.5	200	200
78	0	5.5	5.5	200	200
79	0	5.5	5.5	200	200
8	85800	152.9	327.8	400	630
80	16500	0.0	73.5	0	315
81	24750	0.0	104.5	0	400
82	49500	0.0	195.9	0	500
83	8250	0.0	41.7	0	200
84	8250	0.0	41.7	0	200

85	16500	0.0	73.5	0	315
9	109109	238.3	411.9	500	630

CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA – SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Conduta ID	População	Q_A (l/s)		D_a (mm)	
		Inicial	Final	Inicial	Final
0	6675	38.8	38.8	250	250
1	6675	38.8	38.8	250	250
10	128700	596.2	596.2	710	710
11	143169	658.7	658.7	800	800
12	145468	668.6	668.6	800	800
13	214500	755.7	968.1	800	1000
14	2299	16.1	16.1	160	160
15	3952	25.0	25.0	200	200
16	15888	83.0	83.0	315	315
17	0	3.0	3.0	160	160
18	15888	86.0	86.0	315	315
19	8330	47.0	47.0	250	250
2	12979	69.3	69.3	315	315
20	5599	33.4	33.4	250	250
21	4368	27.2	27.2	200	200
22	9967	54.9	54.9	315	315
23	9338	51.9	51.9	315	315
24	8538	48.0	48	250	250
25	17876	92.3	92.3	400	400
26	28700	141.9	141.9	400	400
27	3060	20.3	20.3	200	200
28	3060	20.3	20.3	200	200
29	6041	35.7	35.7	250	250
3	15121	91.4	91.4	400	400
30	9257	51.5	51.5	315	315
31	49500	3.0	238.2	160	500
32	69032	103.0	324.4	400	630
33	4518	27.9	27.9	200	200
34	4518	27.9	27.9	200	200
35	2773	18.7	18.7	200	200
36	3994	25.2	25.2	200	200
37	8220	46.5	46.5	250	250
38	10993	59.9	59.9	315	315

39	15121	79.4	79.4	315	315
4	40976	212.2	212.2	500	500
40	0	3.0	3.0	160	160
41	0	6.0	6.0	160	160
42	15121	85.4	85.4	315	315
43	4368	27.2	27.2	200	200
44	3483	22.5	22.5	200	200
45	3353	21.8	21.8	200	200
46	6793	39.4	39.4	250	250
47	10275	56.4	56.4	315	315
48	3440	22.3	22.3	200	200
49	3994	25.2	25.2	200	200
5	49306	249.3	249.3	500	500
50	8538	48.0	48.0	250	250
51	3792	24.1	24.1	200	200
52	3742	23.9	23.9	200	200
53	7534	43.1	43.1	250	250
54	10107	55.6	55.6	315	315
55	2573	17.6	17.6	200	200
56	6304	37.0	37.0	250	250
57	10824	59.1	59.1	315	315
58	4226	26.4	26.4	200	200
59	4940	30.1	30.1	250	250
6	83942	401.7	401.7	630	630
60	5107	30.9	30.9	250	250
61	10047	55.3	55.3	315	315
62	5936	35.1	35.1	250	250
63	5936	35.1	35.1	250	250
64	3215	21.1	21.1	200	200
65	3155	20.8	20.8	200	200
66	3742	23.9	23.9	200	200
67	3476	22.5	22.5	200	200
68	3476	22.5	22.5	200	200
69	3353	21.8	21.8	200	200
7	87894	419.0	419.0	630	630
70	2981	19.8	19.8	200	200
71	5107	30.9	30.9	250	250
72	0	3.0	3.0	160	160
73	0	3.0	3.0	160	160
74	0	6.0	6.0	160	160
75	0	3.0	3.0	160	160

76	0	3.0	3.0	160	160
77	0	3.0	3.0	160	160
78	0	3.0	3.0	160	160
79	0	3.0	3.0	160	160
8	105391	495.2	495.2	710	710
80	0	3.0	3.0	160	160
81	16500	0.0	85.9	0	315
82	24750	0.0	123.9	0	400
83	49500	0.0	235.2	0	500
84	8250	0.0	46.6	0	250
85	8250	0.0	46.6	0	250
86	16500	0.0	85.9	0	315
9	108546	508.9	508.9	710	710

CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE TRANSPORTES - SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Eixo ID	Comp. (m)	V (VLE/h)	TV (s)
0 1	72	1852	31.80
0 2	72	737	9.24
1 1	126	1166	28.12
1 2	126	5880	495.20
2 1	14	1831	6.24
2 2	14	7291	84.06
3 1	189	7078	1073.07
3 2	189	1380	15.53
4 1	182	4013	366.28
4 2	182	987	35.31
5 1	246	2559	202.18
5 2	246	367	21.79
6 1	65	3916	124.81
6 2	65	1254	17.29
7 1	361	1190	86.74
7 2	361	780	52.67
8 1	31	1989	14.36
8 2	31	374	2.44
9 1	167	1435	50.61
9 2	167	5543	588.09
10 1	191	6025	570.05
10 2	191	1369	15.48
11 1	288	1445	93.78
11 2	288	225	23.74

12 1	153	1401	44.74
12 2	153	221	11.84
13 1	309	688	40.01
13 2	309	251	25.26
14 1	369	727	51.12
14 2	369	364	33.80
15 1	70	3005	75.55
15 2	70	800	10.00
16 1	107	1865	51.48
16 2	107	279	8.97
17 1	241	1536	84.36
17 2	241	4796	664.92
18 1	224	2867	235.34
18 2	224	751	31.98
19 1	36	5175	85.69
19 2	36	1461	8.67
20 1	188	1687	76.26
20 2	188	383	17.21
21 1	236	1390	72.34
21 2	236	522	25.66
22 1	126	2748	115.19
22 2	126	594	13.96
23 1	273	1502	95.03
23 2	273	1037	56.29
24 1	64	2031	29.78
24 2	64	4800	148.00
25 1	387	1122	86.04
25 2	387	225	31.29
26 1	289	1951	152.85
26 2	289	1339	83.63
27 1	473	490	49.51
27 2	473	309	41.37
28 1	275	1261	73.18
28 2	275	624	33.78
29 1	44	1019	7.87
29 2	44	477	4.07
30 1	30	0	2.00
30 2	30	4590	67.84
31 1	79	0	6.00
31 2	79	4590	203.51
32 1	72	0	5.00

32 2	72	4013	130.81
33 1	117	0	9.00
33 2	117	4099	245.28
34 1	353	0	27.00
34 2	353	4099	735.83
35 1	93	0	7.00
35 2	93	1464	30.44
36 1	229	0	17.00
36 2	229	1464	73.93
37 1	196	0	15.00
37 2	196	3141	246.23
38 1	69	0	5.00
38 2	69	4751	181.34
39 1	361	5	27.00
39 2	361	1106	78.63
40 1	648	2039	367.43
40 2	648	0	49.00
41 1	490	1097	106.57
41 2	490	106	37.65
42 1	502	213	40.70
42 2	502	442	49.61
43 1	1007	151	79.73
43 2	1007	263	85.33
44 1	524	513	56.47
44 2	524	170	41.80
45 1	470	101	36.57
45 2	470	654	60.06
46 1	1004	30	77.11
46 2	1004	364	92.93
47 1	997	22	76.06
47 2	997	447	99.71
48 1	990	0	76.00
48 2	990	673	129.86
49 1	741	2422	116.15
49 2	741	207	57.00
50 1	268	1653	24.50
50 2	268	1630	24.26
51 1	992	1002	78.31
51 2	992	840	77.14
52 1	1007	972	79.07
52 2	1007	1162	81.23

53 1	994	812	77.00
53 2	994	1248	81.57
54 1	226	1537	19.86
54 2	226	978	17.47
55 1	778	601	59.23
55 2	778	1628	71.49
56 1	997	797	76.93
56 2	997	1358	83.80
57 1	364	697	28.20
57 2	364	1001	28.85
58 1	626	172	48.00
58 2	626	1113	50.22
59 1	1009	1608	388.06
59 2	1009	21	77.05
60 1	758	1150	177.79
60 2	758	277	64.95
61 1	234	362	21.68
61 2	234	1643	93.92
62 1	1007	204	82.03
62 2	1007	995	196.02
63 1	994	308	87.28
63 2	994	1354	293.83
64 1	257	1033	50.69
64 2	257	3160	315.48
65 1	747	1715	318.81
65 2	747	582	87.12
66 1	997	908	173.91
66 2	997	383	93.42
67 1	990	243	83.00
67 2	990	186	80.13
68 1	1009	1307	83.78
68 2	1009	544	77.20
69 1	208	2675	40.71
69 2	208	1938	22.80
70 1	784	484	60.10
70 2	784	2773	166.91
71 1	553	646	42.22
71 2	553	4186	430.69
72 1	454	3709	227.86
72 2	454	1789	44.50
73 1	623	1212	50.06

73 2	623	3368	229.25
74 1	371	2689	72.12
74 2	371	2076	43.67
75 1	1004	1193	81.70
75 2	1004	1781	100.34
76 1	301	1294	24.94
76 2	301	3320	107.26
77 1	696	2990	180.72
77 2	696	303	53.01
78 1	990	1190	80.60
78 2	990	69	76.00
79 1	493	3001	127.51
79 2	493	104	37.00
80 1	516	1496	44.89
80 2	516	3254	170.79
81 1	598	2660	115.37
81 2	598	1661	56.54
82 1	394	726	30.25
82 2	394	3441	156.76
83 1	1007	513	77.16
83 2	1007	2601	183.20
84 1	994	456	76.10
84 2	994	2514	167.46
85 1	588	678	45.29
85 2	588	3093	169.08
86 1	416	2719	84.73
86 2	416	1026	33.07
87 1	997	1537	88.80
87 2	997	305	76.02
88 1	225	1508	19.65
88 2	225	272	17.00
89 1	765	429	58.06
89 2	765	372	58.03
90 1	1009	3296	350.95
90 2	1009	158	77.00
91 1	992	2457	159.51
91 2	992	1389	84.52
92 1	318	3027	84.75
92 2	318	1445	27.15
93 1	689	1492	60.92
93 2	689	2572	122.91

94 1	456	2192	59.36
94 2	456	1547	41.05
95 1	538	768	41.43
95 2	538	2240	72.09
96 1	1004	714	77.60
96 2	1004	1238	82.46
97 1	216	1335	17.53
97 2	216	878	16.29
98 1	781	431	60.06
98 2	781	1278	64.83
99 1	444	487	34.06
99 2	444	654	34.19
100 1	546	188	42.00
100 2	546	793	42.50
101 1	1009	2282	703.28
101 2	1009	0	77.00
102 1	992	1516	349.00
102 2	992	519	107.99
103 1	1007	707	137.22
103 2	1007	461	102.61
104 1	994	646	125.59
104 2	994	414	96.32
105 1	429	809	66.77
105 2	429	388	40.77
106 1	575	277	49.28
106 2	575	724	80.06
107 1	410	389	38.35
107 2	410	343	36.71
108 1	587	175	47.14
108 2	587	491	61.98
109 1	990	57	76.38
109 2	990	134	78.14
110 1	1009	1572	374.43
110 2	1009	0	77.00
111 1	992	2220	661.05
111 2	992	0	76.00
112 1	1007	1015	200.87
112 2	1007	393	95.61
113 1	994	572	114.84
113 2	994	301	86.73
114 1	1004	282	86.56

114 2	1004	263	85.34
115 1	997	306	87.11
115 2	997	241	82.88
116 1	476	618	57.46
116 2	476	324	41.92
117 1	514	534	56.39
117 2	514	422	49.85
118 1	1007	1106	224.25
118 2	1007	5	77.00
119 1	992	222	81.85
119 2	992	1335	287.71
120 1	993	1895	502.33
120 2	993	5	76.00
121 1	1001	1403	313.98
121 2	1001	277	86.26
122 1	999	75	76.67
122 2	999	1847	481.07
123 1	182	126	14.35
123 2	182	5036	568.86
124 1	822	920	146.32
124 2	822	1079	177.64
125 1	277	20	21.01
125 2	277	2461	219.73
126 1	724	1572	267.45
126 2	724	0	55.00
127 1	1007	1435	86.83
127 2	1007	386	77.05
128 1	992	1771	98.56
128 2	992	863	77.27
129 1	993	2470	161.24
129 2	993	847	77.18
130 1	1001	3311	355.95
130 2	1001	1662	94.70
131 1	999	1680	94.24
131 2	999	2788	214.33
132 1	803	3103	231.49
132 2	803	2141	99.64
133 1	201	273	15.00
133 2	201	5009	299.72
134 1	1001	0	77.00
134 2	1001	3452	406.44

135 1	1007	70	77.59
135 2	1007	187	81.20
136 1	992	504	106.11
136 2	992	267	84.49
137 1	993	624	122.19
137 2	993	879	167.70
138 1	1001	1553	367.34
138 2	1001	557	114.31
139 1	999	1009	196.82
139 2	999	639	124.52
140 1	1004	661	129.51
140 2	1004	805	154.97
141 1	699	1284	189.63
141 2	699	678	91.03
142 1	302	125	23.56
142 2	302	1723	129.67
143 1	1007	159	77.00
143 2	1007	615	77.33
144 1	298	1246	23.60
144 2	298	1456	24.98
145 1	694	546	53.14
145 2	694	2371	103.48
146 1	993	1084	79.16
146 2	993	2653	189.44
147 1	1001	3501	425.73
147 2	1001	995	79.27
148 1	999	3072	279.99
148 2	999	596	76.29
149 1	1004	1774	100.00
149 2	1004	1023	79.54
150 1	346	1570	30.76
150 2	346	805	26.33
151 1	655	496	50.09
151 2	655	846	50.77
152 1	1007	124	78.85
152 2	1007	343	91.17
153 1	992	142	78.41
153 2	992	1357	294.55
154 1	993	937	180.17
154 2	993	1070	211.94
155 1	1001	1731	437.50

155 2	1001	663	129.94
156 1	999	1534	355.44
156 2	999	109	77.42
157 1	1004	688	133.91
157 2	1004	210	82.31
158 1	706	612	85.63
158 2	706	323	62.80
159 1	295	216	23.60
159 2	295	469	29.55
160 1	1007	237	83.78
160 2	1007	147	79.60
161 1	586	728	82.26
161 2	586	1104	130.71
162 1	406	592	47.98
162 2	406	1580	151.94
163 1	993	869	165.77
163 2	993	1250	261.43
164 1	1001	1665	410.56
164 2	1001	606	121.22
165 1	999	1615	385.70
165 2	999	94	77.06
166 1	1004	727	140.54
166 2	1004	187	81.21
167 1	1001	142	79.44
167 2	1001	96	78.11
168 1	584	348	52.32
168 2	584	99	44.67
169 1	423	703	56.71
169 2	423	864	69.32
170 1	992	478	103.10
170 2	992	896	171.27
171 1	282	971	51.91
171 2	282	920	48.77
172 1	711	746	100.93
172 2	711	1160	167.55
173 1	1001	1452	330.63
173 2	1001	301	87.87
174 1	999	1314	281.06
174 2	999	167	79.32
175 1	1004	584	118.09
175 2	1004	117	78.66

176 1	1001	329	90.03
176 2	1001	101	78.23
177 1	1007	791	152.25
177 2	1007	0	77.00
178 1	992	459	101.02
178 2	992	609	120.08
179 1	993	532	109.66
179 2	993	626	122.58
180 1	1001	1234	260.21
180 2	1001	206	82.12
181 1	999	1167	237.62
181 2	999	82	76.81
182 1	1004	641	126.46
182 2	1004	161	80.14
183 1	1001	669	130.91
183 2	1001	268	85.61
184 1	500	607	59.88
184 2	500	1121	112.61
185 1	1000	901	172.40
185 2	1000	1072	212.47
186 1	1000	727	138.76
186 2	1000	810	153.91
187 1	1000	541	110.76
187 2	1000	510	106.89
188 1	1000	809	153.72
188 2	1000	976	189.12
189 1	1000	447	99.73
189 2	1000	508	106.65

ANEXO B

Cidade média;

Crescimento populacional de 30%;

Três densidades permitidas na expansão (75 hab/ha; 50 hab/ha; 25 hab/ha);

Combinação de pesos 1;

$a=0.6$; $r=0.6$; $n_1=90$; $n_2=10$.

(normalização da função objetivo com valores relativos à cidade média e com um crescimento populacional de 30%)

VALORES INICIAIS

Execução	Temperatura inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento			
			C_A	C_{AR}	E_A	total
1	0.342	91.00	0.236	0.221	0.0002	0.457
2	0.328	91.67	0.178	0.239	0.0001	0.417
3	0.366	89.44	0.274	0.229	0.0004	0.503
4	0.319	88.52	0.206	0.168	0	0.374
5	0.366	90.00	0.282	0.289	0.0003	0.571
6	0.305	89.17	0.235	0.258	0	0.493
7	0.287	88.33	0.179	0.294	0.0001	0.473
8	0.323	88.89	0.205	0.202	0.0004	0.407
9	0.310	88.00	0.196	0.183	0.0002	0.379
10	0.373	92.00	0.291	0.253	0	0.544

Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.185	0.208	0.266	0.659	0.336	0.295	0.631	1.747	1.747
0.162	0.228	0.304	0.694	0.282	0.284	0.566	1.677	1.677
0.227	0.244	0.252	0.723	0.379	0.264	0.643	1.869	1.869
0.168	0.214	0.318	0.700	0.301	0.255	0.556	1.63	1.63
0.228	0.132	0.265	0.625	0.388	0.287	0.675	1.871	1.871
0.181	0.049	0.205	0.435	0.317	0.314	0.631	1.559	1.559
0.130	0.170	0.196	0.496	0.244	0.255	0.499	1.468	1.468
0.159	0.222	0.235	0.616	0.262	0.364	0.626	1.649	1.649
0.158	0.169	0.244	0.571	0.293	0.343	0.636	1.586	1.586
0.247	0.182	0.216	0.645	0.389	0.325	0.714	1.903	1.903

VALORES FINAIS

Execução	Abastecimento				Drenagem			
	C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total
1	0.091	0.046	0	0.137	0.052	0.112	0.163	0.327
2	0.091	0.046	0	0.137	0.052	0.112	0.168	0.332
3	0.091	0.046	0	0.137	0.052	0.112	0.165	0.329
4	0.091	0.046	0	0.137	0.052	0.112	0.163	0.327
5	0.091	0.046	0	0.137	0.052	0.112	0.168	0.332
6	0.091	0.046	0	0.137	0.052	0.108	0.171	0.331
7	0.091	0.046	0	0.137	0.052	0.108	0.171	0.331
8	0.091	0.046	0	0.137	0.052	0.108	0.171	0.331
9	0.091	0.046	0	0.137	0.052	0.108	0.167	0.327
10	0.091	0.046	0	0.137	0.052	0.112	0.163	0.327

Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)	Desvio
C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos		
0.106	0.215	0.321	0.785	0.785	26.10	0.64
0.106	0.211	0.317	0.786	0.786	17.24	0.77
0.106	0.219	0.325	0.791	0.791	24.01	1.41
0.106	0.215	0.321	0.785	0.785	22.60	0.64
0.106	0.211	0.317	0.786	0.786	15.10	0.77
0.106	0.206	0.312	0.780	0.780	13.24	0.00
0.106	0.206	0.312	0.780	0.780	20.48	0.00
0.106	0.206	0.312	0.780	0.780	13.10	0.00
0.106	0.219	0.325	0.789	0.789	11.79	1.15
0.106	0.215	0.321	0.785	0.785	26.65	0.64
		média	0.780	média	19.03	
		mínimo	0.780			

Notas:

- C_A , C_{AR} , E_A , C_D , C_{DR} , E_D , C_T e T são os valores normalizados das grandezas apresentadas no capítulo 4.

ANEXO C

SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Cidade média (mesma cidade que a considerada no Anexo A);

Crescimento populacional de 30%;

Duas densidades permitidas na expansão (50 hab/ha; 25 hab/ha);

Combinação de pesos 1;

$a=0.6$; $r=0.6$; $n_1=90$; $n_2=10$.

(normalização da função objetivo com valores relativos à cidade média e com um crescimento populacional de 30%)

CARACTERIZAÇÃO DOS NOVOS CENTRÓIDES QUE CONSTITUEM A SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Centróides ID	X(m)	Y(m)	Z(m)	Tipo	População	Emprego	Emp. B.	Emp. NB.	Indúst.	Comer. Grde. Dist.	Comer. Serv.
37	2500	2500	152.5	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
38	1500	2500	133.8	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
39	500	2500	124.7	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
40	2500	1500	102.0	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
41	2500	500	75.4	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
42	1500	1500	85.1	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
43	1500	500	57.6	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
44	1500	3500	158.9	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
45	500	500	48.8	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0

Centróide ID	Avaliação do Índice de Aptidão				Densidade populacional (hab/ha)
	Inclinação	Exposição solar	Permeabilidade	Final	
37	ideal	boa	0	3	50
38	ideal	boa	0	3	50
39	ideal	boa	0	3	50
40	ideal	boa	0	3	50
41	ideal	boa	0	3	50
42	ideal	boa	0	3	50
43	fraca	boa	0	3	50
44	ideal	boa	0	3	50
45	fraca	boa	0	3	50

CARACTERIZAÇÃO DOS CENTRÓIDES APÓS EXPANSÃO –SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Centróide ID	X(m)	Y(m)	Z(m)	Tipo	População	Emprego	Emp. B.	Emp. NB.	Indúst.	Come. Grde. Dist.	Come. Serv.
1	6413	3655	169.6	Residencial	6068	1214	0	1214	0	0	0
2	4186	7131	285.5	Central	2090	13492	12656	836	0	0	12656
3	6939	6991	189.0	Central	3593	10689	9252	1437	0	0	9252
4	8295	4202	244.6	Residencial	14444	2889	0	2889	0	0	0
5	8276	7187	175.5	Residencial	7573	1515	0	1515	0	0	0
6	8752	8744	200.8	Residencial	5090	1018	0	1018	0	0	0
7	7174	5070	219.0	Residencial	8489	1698	0	1698	0	0	0
8	3851	9413	243.0	Residencial	2782	3038	2482	556	0	0	0
9	6454	8692	191.7	Residencial	4107	821	0	821	0	0	0
10	4903	6171	263.5	Central	2521	10457	9449	1008	0	0	9449
11	9000	6195	226.8	Residencial	13746	2749	0	2749	0	0	0
12	7994	9709	248.7	Residencial	3971	794	0	794	0	0	0
13	3265	6157	277.0	Residencial	3166	633	0	633	0	0	0
14	3046	4696	214.1	Residencial	3127	625	0	625	0	0	0
15	4077	3632	185.4	Residencial	3631	726	0	726	0	0	0
16	7422	3302	206.2	Residencial	7762	1552	0	1552	0	0	0
17	5265	8883	236.0	Residencial	3447	689	0	689	0	0	0

18	5234	7757	250.0	Central	2339	9702	8766	936	0	0	8766
19	6029	5229	198.1	Residencial	5731	1146	0	1146	0	0	0
20	7886	6040	228.2	Residencial	9840	1968	0	1968	0	0	0
21	4271	5193	240.1	Residencial	3842	768	0	768	0	0	0
22	5062	4237	190.8	Residencial	4491	898	0	898	0	0	0
23	7726	8124	168.4	Residencial	5396	1079	0	1079	0	0	0
24	3217	7716	275.1	Residencial	2923	3420	2835	585	0	0	0
25	5862	6941	220.1	Central	2868	8330	7183	1147	0	0	7183
26	5961	9610	217.1	Residencial	3402	680	0	680	0	0	0
27	4198	8404	252.9	Residencial	3160	3540	2908	632	0	0	0
28	3014	3473	180.6	Residencial	3048	610	0	610	0	0	0
29	3126	8715	233.3	Residencial	2710	2407	1865	542	0	0	0
30	5447	3295	163.6	Residencial	4643	929	0	929	0	0	0
31	9572	8028	198.9	Comercial	0	11553	11553	0	0	11553	0
32	9421	3724	228.6	Comercial	0	9982	9982	0	0	9982	0
33	8367	2647	178.8	Comercial	0	10599	10599	0	0	10599	0
34	2593	10226	183.7	Industrial	0	12203	12203	0	12203	0	0
35	9132	9801	229.4	Industrial	0	12460	12460	0	12460	0	0
36	9562	4823	242.3	Industrial	0	9624	9624	0	9624	0	0

CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM DE ÁGUAS RESIDUAIS - SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Coletor ID	População	Q_D (l/s)		D_d (mm)	
		Inicial	Final	Inicial	Final
0	6675	35.5	35.5	200	200
1	4518	26.8	26.8	200	200
10	130558	316.2	488.9	630	710
11	165194	441.1	613.0	710	800
12	199379	563.7	735.0	800	1000
13	2299	17.5	17.5	200	200
14	3476	22.5	22.5	200	200
15	5775	31.9	31.9	200	200
16	8548	42.9	42.9	250	250
17	12774	59.3	59.3	250	250
18	16768	74.5	74.5	315	315
19	3952	24.5	24.5	200	200
2	8470	42.6	42.6	250	250
20	15888	71.2	71.2	315	315
21	4368	26.2	26.2	200	200
22	9967	48.4	48.4	250	250

23	18297	80.3	80.3	315	315
24	34186	139.6	139.6	400	400
25	8330	42.0	42.0	250	250
26	5599	31.2	31.2	200	200
27	9338	46.0	46.0	250	250
28	5936	32.5	32.5	200	200
29	16760	74.5	74.5	315	315
3	14774	66.9	66.9	315	315
30	26098	109.6	109.6	400	400
31	34636	141.3	141.3	400	400
32	3060	20.7	20.7	200	200
33	3060	20.7	20.7	200	200
34	6041	33.0	33.0	200	200
35	9257	45.7	45.7	250	250
36	12739	59.1	59.1	250	250
37	16179	72.3	72.3	315	315
38	4518	26.8	26.8	200	200
39	2773	19.5	19.5	200	200
4	21449	92.2	92.2	315	315
40	15121	68.3	68.3	315	315
41	0	5.5	5.5	200	200
42	0	5.5	5.5	200	200
43	15121	79.3	79.3	315	315
44	15121	84.8	84.8	315	315
45	15121	90.3	90.3	315	315
46	15121	68.3	68.3	315	315
47	4368	26.2	26.2	200	200
48	3483	22.5	22.5	200	200
49	3440	22.3	22.3	200	200
5	49500	5.5	195.9	200	500
50	3994	24.6	24.6	200	200
51	8538	42.8	42.8	250	250
52	3792	23.8	23.8	200	200
53	3742	23.6	23.6	200	200
54	7534	38.9	38.9	200	200
55	10107	49.0	49.0	250	250
56	13262	61.1	61.1	250	250
57	18202	79.9	79.9	315	315
58	23309	99.2	99.2	315	315
59	2573	18.7	18.7	200	200
6	52853	27.5	208.2	200	500

60	6304	34.0	34.0	200	200
61	10824	51.8	51.8	250	250
62	4226	25.6	25.6	200	200
63	4940	28.5	28.5	200	200
64	5936	32.5	32.5	200	200
65	3215	21.4	21.4	200	200
66	3155	21.1	21.1	200	200
67	3742	23.6	23.6	200	200
68	3476	22.5	22.5	200	200
69	3353	22.0	22.0	200	200
7	69032	90.5	267.1	315	630
70	2981	20.4	20.4	200	200
71	5107	29.2	29.2	200	200
72	0	5.5	5.5	200	200
73	0	5.5	5.5	200	200
74	0	5.5	5.5	200	200
75	0	5.5	5.5	200	200
76	0	5.5	5.5	200	200
77 1	0	5.5	5.5	200	200
77 2	5500	5.5	36.3	200	200
78	0	5.5	5.5	200	200
79	0	5.5	5.5	200	200
8	85800	152.9	327.8	400	630
80	16500	0.0	73.5	0	315
81	27500	0.0	114.8	0	400
82	44000	0.0	175.8	0	500
83	5500	0.0	30.8	0	200
84	11000	0.0	52.4	0	250
85	5500	0.0	30.8	0	200
86	5500	0.0	30.8	0	200
87	11000	0.0	52.4	0	250
88	5500	0.0	30.8	0	200
9	109109	238.3	411.9	500	630

CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA – SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Conduta ID	População	Q_A (l/s)		D_a (mm)	
		Inicial	Final	Inicial	Final
0	6675	38.8	38.8	250	250

1	6675	38.8	38.8	250	250
10	128700	596.2	596.2	710	710
11	143169	658.7	658.7	800	800
12	145468	668.6	668.6	800	800
13	214500	755.7	968.1	800	1000
14	2299	16.1	16.1	160	160
15	3952	25.0	25.0	200	200
16	15888	83.0	83.0	315	315
17	0	3.0	3.0	160	160
18	15888	86.0	86.0	315	315
19	8330	47.0	47.0	250	250
2	12979	69.3	69.3	315	315
20	5599	33.4	33.4	250	250
21	4368	27.2	27.2	200	200
22	9967	54.9	54.9	315	315
23	9338	51.9	51.9	315	315
24	8538	48.0	48.0	250	250
25	17876	92.3	92.3	400	400
26	28700	141.9	141.9	400	400
27	3060	20.3	20.3	200	200
28	3060	20.3	20.3	200	200
29	6041	35.7	35.7	250	250
3	15121	91.4	91.4	400	400
30	9257	51.5	51.5	315	315
31	49500	3.0	238.2	160	500
32	69032	103.0	324.4	400	630
33	4518	27.9	27.9	200	200
34	4518	27.9	27.9	200	200
35	2773	18.7	18.7	200	200
36	3994	25.2	25.2	200	200
37	8220	46.5	46.5	250	250
38	10993	59.9	59.9	315	315
39	15121	79.4	79.4	315	315
4	40976	212.2	212.2	500	500
40	0	3.0	3.0	160	160
41	0	6.0	6.0	160	160
42	15121	85.4	85.4	315	315
43	4368	27.2	27.2	200	200
44	3483	22.5	22.5	200	200
45	3353	21.8	21.8	200	200
46	6793	39.4	39.4	250	250

47	10275	56.4	56.4	315	315
48	3440	22.3	22.3	200	200
49	3994	25.2	25.2	200	200
5	49306	249.3	249.3	500	500
50	8538	48.0	48.0	250	250
51	3792	24.1	24.1	200	200
52	3742	23.9	23.9	200	200
53	7534	43.1	43.1	250	250
54	10107	55.6	55.6	315	315
55	2573	17.6	17.6	200	200
56	6304	37.0	37.0	250	250
57	10824	59.1	59.1	315	315
58	4226	26.4	26.4	200	200
59	4940	30.1	30.1	250	250
6	83942	401.7	401.7	630	630
60	5107	30.9	30.9	250	250
61	10047	55.3	55.3	315	315
62	5936	35.1	35.1	250	250
63	5936	35.1	35.1	250	250
64	3215	21.1	21.1	200	200
65	3155	20.8	20.8	200	200
66	3742	23.9	23.9	200	200
67	3476	22.5	22.5	200	200
68	3476	22.5	22.5	200	200
69	3353	21.8	21.8	200	200
7	87894	419	419	630	630
70	2981	19.8	19.8	200	200
71	5107	30.9	30.9	250	250
72	0	3.0	3.0	160	160
73	0	3.0	3.0	160	160
74	0	6.0	6.0	160	160
75	0	3.0	3.0	160	160
76	0	3.0	3.0	160	160
77	0	3.0	3.0	160	160
78	0	3.0	3.0	160	160
79	0	3.0	3.0	160	160
8	105391	495.2	495.2	710	710
80	0	3.0	3.0	160	160
81	16500	0.0	85.9	0	315
82	27500	0.0	136.5	0	400
83	44000	0.0	210.7	0	500

84	49500	0.0	235.2	0	500
85	5500	0.0	32.9	0	250
86	11000	0.0	59.9	0	315
87	5500	0.0	32.9	0	250
88	5500	0.0	32.9	0	250
89	11000	0.0	59.9	0	315
9	108546	508.9	508.9	710	710
90	5500	0.0	32.9	0	250

CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE TRANSPORTES – SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Eixo ID	Comp. (m)	V (VLE/h)	TV (s)
0 1	72	1849	31.71
0 2	72	734	9.21
1 1	126	1168	28.18
1 2	126	5895	497.69
2 1	14	1830	6.23
2 2	14	7291	84.06
3 1	189	7076	1071.88
3 2	189	1378	15.52
4 1	182	4012	366.10
4 2	182	986	35.27
5 1	246	2559	202.18
5 2	246	367	21.79
6 1	65	3915	124.74
6 2	65	1253	17.27
7 1	361	1190	86.74
7 2	361	781	52.73
8 1	31	1988	14.35
8 2	31	373	2.43
9 1	167	1434	50.56
9 2	167	5546	588.72
10 1	191	6025	570.05
10 2	191	1369	15.48
11 1	288	1445	93.78
11 2	288	225	23.74
12 1	153	1405	44.93
12 2	153	225	11.87
13 1	309	695	40.36
13 2	309	258	25.39

14 1	369	720	50.68
14 2	369	357	33.58
15 1	70	3006	75.59
15 2	70	801	10.01
16 1	107	1865	51.48
16 2	107	279	8.97
17 1	241	1536	84.36
17 2	241	4799	665.73
18 1	224	2866	235.18
18 2	224	750	31.94
19 1	36	5174	85.66
19 2	36	1460	8.66
20 1	188	1687	76.26
20 2	188	383	17.21
21 1	236	1387	72.11
21 2	236	519	25.58
22 1	126	2747	115.12
22 2	126	593	13.95
23 1	273	1504	95.22
23 2	273	1042	56.63
24 1	64	2031	29.78
24 2	64	4801	148.06
25 1	387	1122	86.04
25 2	387	225	31.29
26 1	289	1950	152.71
26 2	289	1343	84.00
27 1	473	481	49.01
27 2	473	301	41.10
28 1	275	1261	73.18
28 2	275	626	33.86
29 1	44	1012	7.80
29 2	44	470	4.04
30 1	30	0	2.00
30 2	30	4590	67.84
31 1	79	0	6.00
31 2	79	4590	203.51
32 1	72	0	5.00
32 2	72	4013	130.81
33 1	117	0	9.00
33 2	117	4090	244.24
34 1	353	0	27.00

34 2	353	4090	732.72
35 1	93	0	7.00
35 2	93	1466	30.51
36 1	229	0	17.00
36 2	229	1466	74.09
37 1	196	0	15.00
37 2	196	3141	246.23
38 1	69	0	5.00
38 2	69	4748	181.12
39 1	361	5	27.00
39 2	361	1106	78.63
40 1	648	2039	367.43
40 2	648	0	49.00
41 1	490	1097	106.57
41 2	490	106	37.65
42 1	502	213	40.71
42 2	502	442	49.61
43 1	1007	151	79.73
43 2	1007	263	85.33
44 1	524	513	56.47
44 2	524	170	41.81
45 1	470	100	36.57
45 2	470	654	60.06
46 1	1004	30	77.11
46 2	1004	364	92.93
47 1	997	22	76.06
47 2	997	447	99.71
48 1	990	0	76.00
48 2	990	673	129.86
49 1	741	2422	116.07
49 2	741	207	57.00
50 1	268	1652	24.49
50 2	268	1630	24.26
51 1	992	1002	78.30
51 2	992	841	77.15
52 1	1007	972	79.07
52 2	1007	1162	81.23
53 1	994	810	76.99
53 2	994	1250	81.59
54 1	226	1534	19.84
54 2	226	977	17.47

55 1	778	596	59.22
55 2	778	1624	71.38
56 1	997	774	76.82
56 2	997	1340	83.39
57 1	364	687	28.19
57 2	364	976	28.76
58 1	626	163	48.00
58 2	626	1086	50.01
59 1	1009	1608	388.15
59 2	1009	21	77.05
60 1	758	1150	177.77
60 2	758	277	64.95
61 1	234	361	21.66
61 2	234	1642	93.84
62 1	1007	204	81.99
62 2	1007	1004	198.18
63 1	994	308	87.28
63 2	994	1354	293.81
64 1	257	1033	50.66
64 2	257	3155	314.55
65 1	747	1722	321.05
65 2	747	581	87.11
66 1	997	927	178.10
66 2	997	383	93.38
67 1	990	250	83.40
67 2	990	199	80.69
68 1	1009	1308	83.79
68 2	1009	544	77.20
69 1	208	2684	41.03
69 2	208	1956	23.06
70 1	784	484	60.10
70 2	784	2782	168.32
71 1	553	645	42.22
71 2	553	4201	436.17
72 1	454	3712	228.50
72 2	454	1806	44.90
73 1	623	1221	50.15
73 2	623	3355	226.48
74 1	371	2699	72.78
74 2	371	2063	43.29
75 1	1004	1199	81.80

75 2	1004	1773	99.95
76 1	301	1289	24.92
76 2	301	3336	108.81
77 1	696	2984	179.60
77 2	696	303	53.01
78 1	990	1213	80.96
78 2	990	72	76.00
79 1	493	3001	127.48
79 2	493	103	37.00
80 1	516	1496	44.88
80 2	516	3254	170.79
81 1	598	2652	114.61
81 2	598	1643	56.09
82 1	394	724	30.25
82 2	394	3429	154.97
83 1	1007	494	77.14
83 2	1007	2594	182.14
84 1	994	441	76.09
84 2	994	2518	168.06
85 1	588	677	45.28
85 2	588	3111	172.06
86 1	416	2721	84.85
86 2	416	1043	33.14
87 1	997	1552	89.29
87 2	997	341	76.03
88 1	225	1485	19.49
88 2	225	275	17.00
89 1	765	435	58.06
89 2	765	405	58.05
90 1	1009	3294	350.26
90 2	1009	158	77.00
91 1	992	2438	156.99
91 2	992	1389	84.52
92 1	318	3023	84.41
92 2	318	1422	26.96
93 1	689	1487	60.81
93 2	689	2548	120.31
94 1	456	2147	57.42
94 2	456	1532	40.81
95 1	538	753	41.40
95 2	538	2254	72.88

96 1	1004	702	77.56
96 2	1004	1234	82.39
97 1	216	1318	17.46
97 2	216	836	16.24
98 1	781	400	60.05
98 2	781	1222	64.03
99 1	444	446	34.04
99 2	444	602	34.13
100 1	546	135	42.00
100 2	546	728	42.36
101 1	1009	2281	702.86
101 2	1009	0	77.00
102 1	992	1524	351.92
102 2	992	517	107.74
103 1	1007	716	138.68
103 2	1007	460	102.41
104 1	994	665	128.59
104 2	994	415	96.43
105 1	429	810	66.81
105 2	429	381	40.49
106 1	575	280	49.39
106 2	575	720	79.59
107 1	410	400	38.76
107 2	410	356	37.13
108 1	587	181	47.30
108 2	587	500	62.55
109 1	990	98	77.14
109 2	990	155	78.85
110 1	1009	1572	374.43
110 2	1009	0	77.00
111 1	992	2216	659.18
111 2	992	0	76.00
112 1	1007	1012	200.14
112 2	1007	394	95.66
113 1	994	556	112.72
113 2	994	283	85.50
114 1	1004	262	85.23
114 2	1004	249	84.47
115 1	997	298	86.55
115 2	997	228	82.19
116 1	476	615	57.27

116 2	476	337	42.39
117 1	514	518	55.36
117 2	514	420	49.75
118 1	1007	1106	224.25
118 2	1007	5	77.00
119 1	992	222	81.85
119 2	992	1334	287.47
120 1	993	1895	502.57
120 2	993	5	76.00
121 1	1001	1403	313.98
121 2	1001	277	86.26
122 1	999	75	76.67
122 2	999	1847	480.97
123 1	182	126	14.35
123 2	182	5034	568.36
124 1	822	919	146.18
124 2	822	1079	177.64
125 1	277	20	21.01
125 2	277	2461	219.73
126 1	724	1572	267.45
126 2	724	0	55.00
127 1	1007	1434	86.82
127 2	1007	386	77.05
128 1	992	1772	98.60
128 2	992	863	77.27
129 1	993	2471	161.40
129 2	993	846	77.18
130 1	1001	3322	359.54
130 2	1001	1662	94.69
131 1	999	1679	94.22
131 2	999	2787	214.28
132 1	803	3103	231.47
132 2	803	2125	98.47
133 1	201	287	15.00
133 2	201	5007	299.10
134 1	1001	0	77.00
134 2	1001	3446	404.36
135 1	1007	71	77.60
135 2	1007	187	81.20
136 1	992	502	105.94
136 2	992	267	84.49

137 1	993	622	122.01
137 2	993	869	165.69
138 1	1001	1557	368.81
138 2	1001	546	112.91
139 1	999	1029	201.81
139 2	999	622	121.95
140 1	1004	661	129.53
140 2	1004	805	154.94
141 1	699	1284	189.63
141 2	699	678	91.03
142 1	302	125	23.56
142 2	302	1723	129.74
143 1	1007	160	77.00
143 2	1007	615	77.33
144 1	298	1248	23.61
144 2	298	1455	24.97
145 1	694	549	53.15
145 2	694	2371	103.46
146 1	993	1086	79.19
146 2	993	2662	190.95
147 1	1001	3470	413.30
147 2	1001	1005	79.37
148 1	999	3049	274.07
148 2	999	609	76.31
149 1	1004	1782	100.39
149 2	1004	1017	79.48
150 1	346	1566	30.72
150 2	346	796	26.31
151 1	655	488	50.09
151 2	655	833	50.72
152 1	1007	123	78.83
152 2	1007	343	91.17
153 1	992	145	78.48
153 2	992	1362	296.16
154 1	993	934	179.56
154 2	993	1074	213.07
155 1	1001	1730	437.24
155 2	1001	661	129.54
156 1	999	1536	356.25
156 2	999	109	77.42
157 1	1004	666	130.37

157 2	1004	207	82.16
158 1	706	606	84.95
158 2	706	325	62.89
159 1	295	212	23.54
159 2	295	473	29.68
160 1	1007	237	83.78
160 2	1007	147	79.60
161 1	586	726	82.04
161 2	586	1098	129.72
162 1	406	596	48.19
162 2	406	1575	151.11
163 1	993	882	168.48
163 2	993	1266	266.24
164 1	1001	1694	422.25
164 2	1001	605	121.07
165 1	999	1650	399.48
165 2	999	94	77.06
166 1	1004	729	140.97
166 2	1004	188	81.24
167 1	1001	151	79.74
167 2	1001	93	78.05
168 1	584	348	52.32
168 2	584	99	44.67
169 1	423	704	56.78
169 2	423	864	69.32
170 1	992	473	102.55
170 2	992	910	174.44
171 1	282	971	51.95
171 2	282	915	48.48
172 1	711	749	101.29
172 2	711	1154	166.45
173 1	1001	1436	325.04
173 2	1001	301	87.93
174 1	999	1301	277.12
174 2	999	167	79.29
175 1	1004	581	117.67
175 2	1004	112	78.51
176 1	1001	348	91.55
176 2	1001	140	79.35
177 1	1007	793	152.63
177 2	1007	0	77.00

178 1	992	464	101.62
178 2	992	595	118.08
179 1	993	531	109.54
179 2	993	611	120.39
180 1	1001	1269	270.70
180 2	1001	208	82.21
181 1	999	1180	241.26
181 2	999	89	76.94
182 1	1004	678	132.36
182 2	1004	181	80.94
183 1	501	241	41.44
183 2	501	681	65.51
184 1	500	477	51.52
184 2	500	780	74.14
185 1	500	739	70.43
185 2	500	1140	115.16
186 1	1000	849	161.60
186 2	1000	1018	199.06
187 1	1000	670	129.31
187 2	1000	740	141.03
188 1	1000	713	136.37
188 2	1000	827	157.22
189 1	1000	346	90.22
189 2	1000	388	93.88
190 1	1000	554	112.45
190 2	1000	517	107.74
191 1	1000	528	109.11
191 2	1000	564	113.77
192 1	1000	282	85.44
192 2	1000	297	86.47
193 1	1000	527	108.98
193 2	1000	390	94.06

ANEXO D

ANÁLISE DO ESFORÇO COMPUTACIONAL COM O CRESCIMENTO POPULACIONAL

Cidade média;

Crescimento populacional de 20%;

Duas densidades permitidas na expansão (50 hab/ha; 25 hab/ha);

Combinação de pesos 1;

$a=0.6$; $r=0.6$; $n_1=90$; $n_2=10$.

(normalização da função objetivo com valores relativos à cidade média e com um crescimento populacional de 45%)

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
		C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.1883	85.67	0.126	0.15	2E-04	0.275	0.105	0.112	0.113	0.330	0.187	0.17	0.357	0.962	0.962
0.1979	87.00	0.161	0.19	1E-04	0.35	0.116	0.059	0.093	0.268	0.212	0.181	0.393	1.011	1.011
0.1981	89.67	0.162	0.16	0	0.32	0.123	0.102	0.099	0.324	0.209	0.159	0.368	1.012	1.012
0.2169	88.13	0.177	0.13	0	0.311	0.142	0.111	0.174	0.427	0.243	0.127	0.370	1.108	1.108
0.2007	87.00	0.105	0.18	0	0.288	0.096	0.186	0.138	0.420	0.177	0.14	0.317	1.025	1.025
0.2286	88.67	0.176	0.13	0	0.307	0.142	0.177	0.147	0.466	0.224	0.171	0.395	1.168	1.168
0.2134	88.00	0.170	0.15	1E-04	0.321	0.135	0.092	0.152	0.379	0.243	0.147	0.390	1.09	1.09

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.07	0.04	0	0.108	0.041	0.079	0.081	0.201	0.081	0.112	0.193	0.502	0.502	27.58
0.07	0.04	0	0.108	0.041	0.079	0.081	0.201	0.081	0.112	0.193	0.502	0.502	18.08
0.07	0.04	0	0.108	0.041	0.079	0.081	0.201	0.081	0.112	0.193	0.502	0.502	28.80
0.07	0.05	0	0.121	0.037	0.079	0.065	0.181	0.075	0.127	0.202	0.504	0.504	27.34
0.07	0.05	0	0.121	0.037	0.079	0.065	0.181	0.075	0.127	0.202	0.504	0.504	16.53
0.07	0.04	0	0.108	0.041	0.079	0.081	0.201	0.081	0.112	0.193	0.502	0.502	25.85
0.07	0.04	0	0.108	0.041	0.079	0.081	0.201	0.081	0.112	0.193	0.502	0.502	31.60
												média	25.11

Cidade média;

Crescimento populacional de 30%;

Duas densidades permitidas na expansão (50 hab/ha; 25 hab/ha);

Combinação de pesos 1;

$a=0.6$; $r=0.6$; $n_1=90$; $n_2=10$.

(normalização da função objetivo com valores relativos à cidade média e com um crescimento populacional de 45%)

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
		C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.3279	90.33	0.271	0.22	3E-04	0.493	0.226	0.161	0.19	0.577	0.356	0.249	0.605	1.675	1.675
0.2731	92.67	0.20	0.19	2E-04	0.388	0.158	0.087	0.142	0.387	0.289	0.331	0.62	1.395	1.395
0.3205	95.00	0.243	0.23	3E-04	0.468	0.199	0.172	0.202	0.573	0.354	0.242	0.596	1.637	1.637
0.2991	90.67	0.228	0.24	0	0.467	0.185	0.165	0.148	0.498	0.297	0.266	0.563	1.528	1.528
0.2837	90.50	0.221	0.19	3E-04	0.413	0.172	0.072	0.143	0.387	0.312	0.337	0.649	1.449	1.449
0.2559	91.00	0.168	0.18	2E-04	0.349	0.131	0.121	0.179	0.431	0.233	0.294	0.527	1.307	1.307

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.093	0.06	0	0.152	0.059	0.097	0.124	0.28	0.114	0.188	0.302	0.734	0.734	25.64
0.093	0.04	0	0.133	0.063	0.094	0.138	0.295	0.121	0.184	0.305	0.733	0.733	23.96
0.093	0.06	0	0.152	0.059	0.097	0.124	0.28	0.114	0.188	0.302	0.734	0.734	40.37
0.093	0.06	0	0.152	0.059	0.097	0.124	0.28	0.114	0.188	0.302	0.734	0.734	25.45
0.093	0.06	0	0.152	0.059	0.094	0.132	0.285	0.114	0.186	0.300	0.737	0.737	33.58
0.093	0.06	0	0.152	0.059	0.097	0.124	0.28	0.114	0.188	0.302	0.734	0.734	26.48
												média	29.25

Cidade média;

Crescimento populacional de 45%;

Duas densidades permitidas na expansão (50 hab/ha; 25 hab/ha);

Combinação de pesos 1;

$a=0.6$; $r=0.6$; $n_1=90$; $n_2=10$.

(normalização da função objetivo com valores relativos à cidade média e com um crescimento populacional de 45%)

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
		C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.4728	93.33	0.333	0.30	0	0.634	0.308	0.237	0.254	0.799	0.482	0.500	0.982	2.415	2.415
0.3806	91.60	0.259	0.27	0	0.524	0.213	0.117	0.231	0.561	0.359	0.500	0.859	1.944	1.944
0.4127	93.11	0.294	0.20	0	0.493	0.262	0.216	0.284	0.762	0.408	0.445	0.853	2.108	2.108
0.4463	93.17	0.333	0.29	2E-04	0.618	0.296	0.229	0.304	0.829	0.500	0.333	0.833	2.280	2.28
0.4579	94.44	0.311	0.31	0	0.625	0.269	0.288	0.255	0.812	0.416	0.486	0.902	2.339	2.339
0.4127	96.33	0.289	0.21	0	0.494	0.249	0.216	0.274	0.739	0.428	0.447	0.875	2.108	2.108

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.113	0.10	0	0.211	0.108	0.026	0.123	0.257	0.200	0.500	0.700	1.168	1.168	45.43
0.13	0.05	0	0.177	0.100	0.141	0.179	0.420	0.186	0.324	0.510	1.107	1.107	45.58
0.106	0.13	0	0.24	0.100	0.033	0.117	0.25	0.187	0.500	0.687	1.177	1.177	33.48
0.13	0.08	0	0.207	0.096	0.141	0.175	0.412	0.18	0.318	0.498	1.117	1.117	31.30
0.13	0.05	0	0.181	0.100	0.141	0.180	0.421	0.186	0.325	0.511	1.113	1.113	37.30
0.13	0.07	0	0.200	0.096	0.141	0.175	0.412	0.189	0.320	0.500	1.112	1.112	37.91
												média	38.50

Notas:

Das várias execuções apresentadas sublinhou-se aquela cujo valor da função objetivo é menor.

ANÁLISE DO ESFORÇO COMPUTACIONAL COM A DIMENSÃO DA CIDADE

Cidade pequena;

Crescimento populacional de 30%;

Duas densidades permitidas na expansão (50 hab/ha; 25 hab/ha);

Combinação de pesos 1;

a=0.6; r=0.6; n₁=90; n₂=10.

(normalização da função objetivo com valores relativos à cidade pequena e com um crescimento populacional de 30%)

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
		C _A	C _{AR}	E _A	total	C _D	C _{DR}	E _D	total	C _T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.3040	86.33	0.202	0.243	0.0141	0.459	0.187	0.103	0.035	0.325	0.358	0.411	0.769	1.553	1.553
0.3473	85.33	0.224	0.282	0	0.506	0.204	0.241	0.111	0.556	0.313	0.399	0.712	1.774	1.774
0.3500	87.33	0.268	0.145	0.0032	0.416	0.202	0.228	0.085	0.515	0.402	0.455	0.857	1.788	1.788
0.3492	88.67	0.236	0.246	0.0115	0.493	0.205	0.196	0.099	0.500	0.400	0.391	0.791	1.784	1.784
0.3302	86.00	0.252	0.251	0.0018	0.505	0.203	0.079	0.057	0.339	0.401	0.442	0.843	1.687	1.687
0.3530	88.33	0.186	0.271	0	0.457	0.133	0.333	0.109	0.575	0.271	0.500	0.771	1.803	1.803
0.3682	86.5	0.305	0.156	0	0.461	0.197	0.279	0.153	0.629	0.401	0.390	0.791	1.881	1.881
0.3704	87.00	0.328	0.283	0	0.611	0.260	0.112	0.100	0.472	0.445	0.364	0.809	1.892	1.892
0.3827	88.53	0.317	0.209	0.0105	0.536	0.252	0.229	0.111	0.592	0.446	0.381	0.827	1.955	1.955
0.3553	87.11	0.247	0.221	0	0.468	0.209	0.263	0.146	0.618	0.357	0.372	0.729	1.815	1.815

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C _A	C _{AR}	E _A	total	C _D	C _{DR}	E _D	total	C _T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.119	0.188	0	0.307	0.100	0.092	0.049	0.241	0.270	0.426	0.696	1.244	1.244	1.84
0.106	0.175	0	0.281	0.106	0.117	0.037	0.26	0.227	0.477	0.704	1.245	1.245	1.04
0.126	0.188	0	0.314	0.137	0.103	0.073	0.313	0.227	0.389	0.616	1.243	1.243	1.72
0.126	0.188	0	0.314	0.137	0.103	0.073	0.313	0.227	0.389	0.616	1.243	1.243	1.59
0.123	0.175	0	0.298	0.123	0.117	0.052	0.292	0.227	0.436	0.663	1.253	1.253	0.83
0.119	0.188	0	0.307	0.100	0.092	0.049	0.241	0.270	0.426	0.696	1.244	1.244	1.33
0.119	0.188	0	0.307	0.100	0.092	0.049	0.241	0.270	0.426	0.696	1.244	1.244	1.96
0.126	0.188	0	0.314	0.137	0.103	0.073	0.313	0.227	0.389	0.616	1.243	1.243	0.89
0.135	0.188	0	0.323	0.116	0.042	0.036	0.194	0.270	0.453	0.723	1.240	1.240	1.06
0.126	0.188	0	0.314	0.137	0.103	0.073	0.313	0.227	0.389	0.616	1.243	1.243	1.87

Cidade grande;

Crescimento populacional de 30%;

Duas densidades permitidas na expansão (50 hab/ha; 25 hab/ha);

Combinação de pesos 1;

 $a=0.6$; $r=0.6$; $n_1=90$; $n_2=10$.

(normalização da função objetivo com valores relativos à cidade pequena e com um crescimento populacional de 30%)

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
		C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.4751	96.17	0.333	0.265	0	0.598	0.333	0.207	0.315	0.855	0.483	0.491	0.974	2.427	2.427
0.3976	93.67	0.269	0.226	0	0.495	0.269	0.166	0.301	0.736	0.401	0.399	0.8	2.031	2.031
0.4048	96.33	0.291	0.208	0	0.499	0.292	0.153	0.278	0.723	0.429	0.417	0.846	2.068	2.068
0.4215	93.47	0.284	0.199	0	0.483	0.284	0.150	0.313	0.747	0.424	0.499	0.923	2.153	2.153
0.3735	93.00	0.227	0.228	0	0.455	0.227	0.177	0.271	0.675	0.324	0.454	0.778	1.908	1.908
0.3970	92.00	0.238	0.230	0	0.468	0.238	0.161	0.295	0.694	0.366	0.500	0.866	2.028	2.028
0.4575	94.15	0.319	0.307	0.0125	0.638	0.319	0.197	0.259	0.775	0.452	0.472	0.924	2.337	2.337

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.086	0.126	0	0.212	0.086	0.032	0.102	0.220	0.141	0.334	0.475	0.907	0.907	222.49
0.086	0.126	0	0.212	0.086	0.032	0.102	0.220	0.141	0.334	0.475	0.907	0.907	244.33
0.078	0.134	0	0.212	0.078	0.037	0.123	0.238	0.127	0.339	0.466	0.916	0.916	281.11
0.075	0.163	0	0.238	0.075	0.105	0.135	0.315	0.123	0.344	0.467	1.020	1.020	191.62
0.084	0.13	0	0.214	0.084	0.032	0.104	0.220	0.137	0.341	0.478	0.912	0.912	174.20
0.086	0.126	0	0.212	0.086	0.032	0.102	0.220	0.141	0.334	0.475	0.907	0.907	224.88
0.078	0.134	0	0.212	0.078	0.037	0.13	0.245	0.127	0.34	0.467	0.924	0.924	284.19

ANÁLISE DO ESFORÇO COMPUTACIONAL COM AS VÁRIAS COMBINAÇÕES DE PESOS CONSIDERADAS

Cidade média;

Crescimento populacional de 30%;

Duas densidades permitidas na expansão (50 hab/ha; 25 hab/ha);

Combinação de pesos 1;

$a=0.6$; $r=0.6$; $n_1=90$; $n_2=10$.

(normalização da função objetivo com valores relativos à cidade média e com um crescimento populacional de 30%)

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
		C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.3338	88.67	0.231	0.290	0.0003	0.521	0.186	0.123	0.249	0.558	0.313	0.313	0.626	1.705	1.705
0.3620	92.44	0.298	0.270	0.0003	0.568	0.240	0.152	0.227	0.619	0.391	0.271	0.662	1.849	1.849
0.3620	92.44	0.298	0.270	0.0003	0.568	0.240	0.152	0.227	0.619	0.391	0.271	0.662	1.849	1.849
0.3986	91.52	0.313	0.282	0	0.595	0.253	0.197	0.218	0.668	0.432	0.341	0.773	2.036	2.036
0.3156	94.00	0.238	0.195	0.0002	0.433	0.189	0.193	0.199	0.581	0.319	0.279	0.598	1.612	1.612

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.119	0.046	0	0.165	0.081	0.108	0.181	0.370	0.158	0.208	0.366	0.901	0.901	19.32
0.119	0.068	0	0.187	0.076	0.112	0.164	0.352	0.149	0.212	0.361	0.900	0.900	23.22
0.119	0.068	0	0.187	0.076	0.112	0.164	0.352	0.149	0.212	0.361	0.900	0.900	23.22
0.119	0.068	0	0.187	0.076	0.108	0.175	0.359	0.149	0.208	0.357	0.903	0.903	24.65
0.119	0.068	0	0.187	0.076	0.108	0.175	0.359	0.149	0.208	0.357	0.903	0.903	24.75
												média	23.03

Cidade média;

Crescimento populacional de 30%;

Duas densidades permitidas na expansão (50 hab/ha; 25 hab/ha);

Combinação de pesos 2 (transportes);

$\alpha=0.6$; $r=0.6$; $n_1=90$; $n_2=10$.

(normalização da função objetivo com valores relativos à cidade média e com um crescimento populacional de 30%)

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
		C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.4035	91.73	0.282	0.178	0.0003	0.460	0.235	0.19	0.225	0.650	0.405	0.370	0.775	2.061	1.885
0.3747	93.33	0.276	0.238	0.0003	0.514	0.223	0.202	0.205	0.630	0.379	0.303	0.682	1.914	1.826
0.3567	91.47	0.26	0.184	0.0001	0.444	0.218	0.217	0.235	0.670	0.379	0.262	0.641	1.822	1.755
0.3506	89.56	0.216	0.333	0.0003	0.549	0.171	0.223	0.221	0.615	0.313	0.294	0.607	1.791	1.771
0.4281	93.00	0.333	0.265	0.0004	0.598	0.307	0.162	0.190	0.659	0.469	0.327	0.796	2.187	2.053
0.3420	87.33	0.236	0.251	0.0003	0.487	0.180	0.176	0.178	0.534	0.297	0.333	0.630	1.747	1.651
0.3849	93.11	0.278	0.271	0.0002	0.549	0.221	0.136	0.193	0.55	0.408	0.318	0.726	1.966	1.825

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.119	0.068	0	0.187	0.076	0.108	0.175	0.359	0.149	0.208	0.357	0.970	0.903	26.65
0.119	0.046	0	0.165	0.081	0.112	0.184	0.377	0.158	0.203	0.361	0.975	0.903	25.14
0.119	0.068	0	0.187	0.076	0.112	0.164	0.352	0.149	0.212	0.361	0.973	0.900	36.14
0.119	0.068	0	0.187	0.076	0.108	0.175	0.359	0.149	0.208	0.357	0.970	0.903	32.53
0.120	0.102	0	0.222	0.072	0.108	0.154	0.334	0.141	0.231	0.372	1.003	0.928	22.42
0.119	0.068	0	0.187	0.076	0.108	0.175	0.359	0.149	0.208	0.357	0.970	0.903	17.86
0.119	0.068	0	0.187	0.076	0.108	0.175	0.359	0.149	0.208	0.357	0.970	0.903	34.77
												média	27.93

Cidade média;

Crescimento populacional de 30%;

Duas densidades permitidas na expansão (50 hab/ha; 25 hab/ha);

Combinação de pesos 3 (abastecimento);

$a=0.6$; $r=0.6$; $n_1=90$; $n_2=10$.

(normalização da função objetivo com valores relativos à cidade média e com um crescimento populacional de 30%)

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
		C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.3898	91.83	0.333	0.264	0.0004	0.597	0.297	0.162	0.256	0.715	0.500	0.313	0.813	1.991	2.125
0.3220	89.56	0.280	0.201	0.0003	0.481	0.226	0.126	0.243	0.595	0.418	0.285	0.703	1.645	1.779
0.3079	89.50	0.238	0.211	0.0003	0.449	0.204	0.154	0.253	0.611	0.353	0.311	0.664	1.573	1.724
0.3620	89.78	0.277	0.313	0	0.590	0.230	0.129	0.229	0.588	0.425	0.298	0.723	1.849	1.901
0.3017	89.33	0.242	0.234	0.0002	0.476	0.190	0.136	0.187	0.513	0.328	0.299	0.627	1.541	1.616
0.2974	87.73	0.225	0.203	0.0004	0.428	0.188	0.142	0.188	0.518	0.349	0.38	0.729	1.519	1.675

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.119	0.046	0	0.165	0.081	0.108	0.180	0.369	0.158	0.213	0.371	0.741	0.905	34.09
0.119	0.046	0	0.165	0.081	0.108	0.181	0.370	0.158	0.208	0.366	0.739	0.901	23.15
0.119	0.046	0	0.165	0.081	0.108	0.181	0.370	0.158	0.208	0.366	0.739	0.901	29.41
0.119	0.046	0	0.165	0.081	0.112	0.184	0.377	0.158	0.203	0.361	0.740	0.903	39.16
0.119	0.046	0	0.165	0.081	0.112	0.165	0.358	0.158	0.222	0.380	0.740	0.903	33.89
0.119	0.046	0	0.165	0.081	0.108	0.181	0.370	0.158	0.208	0.366	0.739	0.901	24.01
												média	30.62

Cidade média;

Crescimento populacional de 30%;

Duas densidades permitidas na expansão (50 hab/ha; 25 hab/ha);

Combinação de pesos 4 (drenagem);

$a=0.6$; $r=0.6$; $n_1=90$; $n_2=10$.

(normalização da função objetivo com valores relativos à cidade média e com um crescimento populacional de 30%)

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
		C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.3563	86.83	0.266	0.263	0.0002	0.529	0.211	0.200	0.206	0.617	0.391	0.262	0.653	1.820	1.799
0.3545	91.83	0.237	0.245	0	0.482	0.227	0.145	0.23	0.602	0.386	0.345	0.731	1.811	1.815
0.3328	89.67	0.274	0.184	0.0003	0.458	0.223	0.142	0.214	0.579	0.384	0.255	0.639	1.700	1.676
0.3825	89.67	0.289	0.202	0	0.491	0.238	0.225	0.229	0.692	0.366	0.324	0.690	1.954	1.873
0.3079	84.67	0.219	0.304	0.0002	0.523	0.164	0.155	0.179	0.498	0.304	0.301	0.605	1.573	1.626
0.3714	88.67	0.258	0.241	0.0003	0.499	0.207	0.214	0.257	0.678	0.348	0.28	0.628	1.897	1.805

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.09	0.215	0	0.305	0.077	0.004	0.104	0.185	0.150	0.5	0.650	0.906	1.140	27.12
0.09	0.208	0	0.298	0.077	0.004	0.101	0.182	0.150	0.5	0.650	0.896	1.130	23.96
0.091	0.250	0	0.341	0.067	0.029	0.088	0.184	0.133	0.5	0.633	0.916	1.158	42.90
0.09	0.195	0	0.285	0.077	0.029	0.088	0.194	0.150	0.5	0.650	0.910	1.129	22.70
0.091	0.250	0	0.341	0.067	0.029	0.088	0.184	0.133	0.5	0.633	0.916	1.158	23.29
0.09	0.208	0	0.298	0.077	0	0.106	0.183	0.15	0.5	0.650	0.898	1.131	22.06
												média	27.00

ANEXO E

Cidade média;

Crescimento populacional de 45%;

Duas densidades permitidas na expansão (50 hab/ha×50% + 25 hab/ha×50%);

$a=0.6$; $r=0.6$; $n_1=90$; $n_2=10$.

(normalização da função objetivo com valores relativos à cidade média e com um crescimento populacional de 45%)

Combinação de pesos 1

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem			Transportes			Função Objetivo		
		C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.4516	96.33	0.311	0.252	0.0003	0.563	0.259	0.19	0.333	0.782	0.474	0.488	0.962	2.307	2.307

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.185	0.145	0	0.33	0.167	0.03	0.171	0.368	0.314	0.5	0.814	1.512	1.512	94.23

CARACTERIZAÇÃO DOS NOVOS CENTRÓIDES QUE CONSTITUEM A SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Centróide ID	X(m)	Y(m)	Z(m)	Tipo	População	Emprego	Emp. B.	Emp. NB.	Indúst.	Comer. Grde. Dist.	Comer. Serv.
37	10500	5500	200.0	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
38	9500	1500	142.8	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
39	9500	500	117.2	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
40	10500	1500	132.4	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
41	10500	2500	159.2	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
42	10500	3500	192.3	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
43	10500	6500	213.6	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
44	11500	2500	135.6	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
45	11500	1500	118.3	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0

46	11500	6500	201.0	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
47	9500	2500	168.4	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
48	10500	500	107.3	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
49	11500	500	92.8	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
50	11500	3500	151.9	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
51	11500	4500	159.7	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
52	6500	2500	148.6	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
53	11500	5500	159.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
54	3500	2500	159.7	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0

Avaliação do Índice de Aptidão					Densidade populacional (hab/ha)
Centróide ID	Inclinação	Exposição solar	Permeabilidade	Final	
37	ideal	razoável	0.31	2	25
38	ideal	boa	0.01	3	25
39	boa	boa	0.01	3	50
40	ideal	boa	0.01	3	50
41	ideal	boa	0.01	3	50
42	ideal	boa	0.01	3	25
43	ideal	boa	0.06	3	50
44	ideal	boa	0.01	3	50
45	ideal	boa	0.01	3	50
46	ideal	boa	0.06	3	25
47	ideal	boa	0.01	3	50
48	ideal	boa	0.01	3	50
49	boa	boa	0.01	3	50
50	ideal	boa	0.01	3	25
51	ideal	boa	0.01	3	25
52	ideal	boa	0.22	3	25
53	ideal	razoável	0.06	3	25
54	ideal	boa	0.26	2	25

Combinação de pesos 2 - Transportes

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
		C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.5186	97.67	0.333	0.333	0	0.666	0.333	0.229	0.304	0.866	0.5	0.5	1	2.649	2.532

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.206	0.135	0	0.341	0.158	0.154	0.254	0.566	0.297	0.374	0.671	1.687	1.578	69.13

CARACTERIZAÇÃO DOS NOVOS CENTRÓIDES QUE CONSTITUEM A SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Centróide ID	X(m)	Y(m)	Z(m)	Tipo	População	Emprego	Emp. B.	Emp. NB.	Indúst.	Comer. Grde. Dist.	Comer. Serv.
37	2500	500	75.4	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
38	1500	500	57.6	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
39	2500	1500	102.0	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
40	4500	1500	105.9	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
41	4500	2500	155.5	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
42	1500	2500	133.8	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
43	1500	3500	158.9	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
44	500	3500	149.4	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
45	500	2500	124.7	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
46	2500	2500	152.5	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
47	3500	2500	159.7	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
48	500	500	48.8	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
49	1500	7500	213.5	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
50	1500	4500	184.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
51	1500	1500	85.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
52	500	7500	185.3	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
53	4500	500	79.4	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
54	500	4500	160.8	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0

Centróide ID	Avaliação do Índice de Aptidão				Densidade populacional hab/ha
	Inclinação	Exposição solar	Permeabilidade	Final	
37	ideal	boa	0	3	25
38	fraca	boa	0	3	50
39	ideal	boa	0	3	25
40	ideal	boa	0.26	2	50
41	ideal	boa	0.26	2	50
42	ideal	boa	0	3	50
43	ideal	boa	0	3	50
44	ideal	boa	0	3	50
45	ideal	boa	0	3	50
46	ideal	boa	0	3	25
47	ideal	boa	0.26	2	50
48	fraca	boa	0	3	50
49	boa	razoável	0	3	25
50	boa	boa	0	3	25
51	ideal	boa	0	3	25
52	boa	razoável	0	3	25
53	boa	boa	0.26	2	25
54	ideal	boa	0	3	25

Combinação de pesos 3 - Abastecimento

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
		C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.4690	96.44	0.333	0.311	0	0.644	0.292	0.311	0.333	0.936	0.471	0.5	0.971	2.396	2.551

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.205	0.058	0	0.263	0.167	0.179	0.262	0.608	0.313	0.393	0.706	1.38	1.577	56.28

CARACTERIZAÇÃO DOS NOVOS CENTRÓIDES QUE CONSTITUEM A SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Centróide ID	X(m)	Y(m)	Z(m)	Tipo	População	Emprego	Emp. B.	Emp. NB.	Indúst.	Comer. Grde. Dist.	Comer. Serv.
37	2500	2500	152.5	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
38	1500	2500	133.8	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
39	2500	500	75.4	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
40	1500	500	57.6	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
41	500	6500	187.1	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
42	2500	1500	102.0	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
43	1500	6500	216.5	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
44	1500	3500	158.9	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
45	1500	1500	85.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
46	1500	4500	184.1	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
47	1500	7500	213.5	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
48	500	7500	185.3	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
49	500	3500	149.4	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
50	500	500	48.8	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
51	500	1500	74.5	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
52	1500	5500	207.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
53	500	4500	160.8	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
54	500	5500	178.0	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0

Centróide ID	Avaliação do Índice de Aptidão				Densidade populacional (hab/ha)
	Inclinação	Exposição solar	Permeabilidade	Final	
37	ideal	boa	0	3	50
38	ideal	boa	0	3	25
39	ideal	boa	0	3	25
40	fraca	boa	0	3	50
41	boa	boa	0	3	50
42	ideal	boa	0	3	50
43	boa	boa	0	3	50
44	ideal	boa	0	3	50
45	ideal	boa	0	3	25
46	boa	boa	0	3	50
47	boa	razoável	0	3	25
48	boa	razoável	0	3	25
49	ideal	boa	0	3	50
50	fraca	boa	0	3	50
51	ideal	boa	0	3	25
52	boa	boa	0.28	2	25
53	ideal	boa	0	3	25
54	boa	boa	0	2	25

Combinação de pesos 4 - Drenagem

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
		C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.5041	96.33	0.333	0.284	0	0.617	0.333	0.248	0.333	0.914	0.5	0.489	0.989	2.307	2.307

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.185	0.145	0	0.33	0.167	0.03	0.171	0.368	0.314	0.5	0.814	1.414	1.522	68.63

CARACTERIZAÇÃO DOS NOVOS CENTRÓIDES QUE CONSTITUEM A SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Centróide ID	X(m)	Y(m)	Z(m)	Tipo	População	Emprego	Emp. B.	Emp. NB.	Indúst.	Comer. Grde. Dist.	Comer. Serv.
37	9500	2500	168.4	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
38	9500	1500	142.8	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
39	9500	500	117.2	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
40	10500	6500	213.6	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
41	10500	5500	200.0	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
42	10500	7500	233.2	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
43	10500	8500	194.9	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
44	10500	1500	132.4	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
45	6500	2500	148.6	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
46	10500	2500	159.2	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
47	11500	7500	204.9	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
48	10500	500	107.3	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
49	10500	3500	192.3	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
50	11500	3500	151.9	Residencial	5000	1000	0	1000	0	0	0
51	11500	6500	2010.	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
52	11500	4500	159.7	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
53	3500	2500	159.7	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
54	11500	2500	135.6	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0

Centróide ID	Avaliação do Índice de Aptidão				Densidade populacional (hab/ha)
	Inclinação	Exposição solar	Permeabilidade	Final	
37	ideal	boa	0.01	3	50
38	ideal	boa	0.01	3	50
39	boa	boa	0.01	3	25
40	ideal	boa	0.06	3	50
41	ideal	razoável	0.31	2	25
42	ideal	boa	0.06	3	50
43	ideal	razoável	0.06	3	50
44	ideal	boa	0.01	3	50
45	ideal	boa	0.22	2	25
46	ideal	boa	0.01	2	25
47	ideal	boa	0.06	3	50
48	ideal	boa	0.01	3	25
49	ideal	boa	0.01	3	50
50	ideal	boa	0.01	3	50
51	ideal	boa	0.06	3	25
52	ideal	boa	0.01	3	25
53	ideal	boa	0.26	2	25
54	ideal	boa	0.01	3	25

ANEXO F

Cidade média;

Crescimento populacional de 45%;

Uma densidade populacional permitida na expansão (25 hab/ha×100%).

(normalização da função objetivo com valores relativos à cidade média e com um crescimento populacional de 45%)

Combinação de pesos 1

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
		C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.4927	98.67	0.333	0.333	0	0.666	0.33	0.205	0.31	0.851	0.5	0.5	1	2.517	2.517

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.333	0.287	0	0.62	0.33	0.237	0.33	0.903	0.5	0.5	0.94	1.961	1.961	163.58

CARACTERIZAÇÃO DOS NOVOS CENTRÓIDES QUE CONSTITUEM A SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Centróide ID	X(m)	Y(m)	Z(m)	Tipo	População	Emprego	Emp. B.	Emp. NB.	Indúst.	Comer. Grde. Dist.	Comer. Serv.
37	9500	2500	168.4	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
38	9500	1500	142.8	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
39	10500	5500	200.0	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
40	2500	2500	152.5	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
41	10500	1500	132.4	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
42	11500	1500	118.3	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
43	10500	2500	159.2	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
44	11500	2500	135.6	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
45	6500	2500	148.6	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
46	3500	2500	159.7	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
47	10500	6500	213.6	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
48	9500	500	117.2	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0

49	10500	500	107.3	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
50	11500	500	92.8	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
51	10500	3500	192.3	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
52	11500	3500	151.9	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
53	10500	7500	233.2	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
54	11500	6500	201.0	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
55	3500	1500	110.7	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
56	1500	4500	184.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
57	4500	2500	155.5	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
58	11500	5500	159.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
59	1500	2500	133.8	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
60	2500	1500	102.0	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
61	11500	7500	204.9	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
62	500	2500	124.7	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
63	1500	3500	158.9	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0

Centróide ID	Avaliação do Índice de Aptidão				Densidade populacional (hab/ha)
	Inclinação	Exposição solar	Permeabilidade	Final	
37	ideal	boa	0.01	3	25
38	ideal	boa	0.01	3	25
39	ideal	razoável	0.31	2	25
40	ideal	boa	0	3	25
41	ideal	boa	0.01	3	25
42	ideal	boa	0.01	3	25
43	ideal	boa	0.01	3	25
44	ideal	boa	0.01	3	25
45	ideal	boa	0.22	3	25
46	ideal	boa	0.26	2	25
47	ideal	boa	0.06	3	25
48	boa	boa	0.01	3	25
49	ideal	boa	0.01	3	25
50	boa	boa	0.01	3	25
51	ideal	boa	0.01	3	25
52	ideal	boa	0.01	3	25
53	ideal	boa	0.06	3	25
54	ideal	boa	0.06	3	25
55	ideal	boa	0.26	2	25
56	boa	boa	0	3	25
57	ideal	boa	0.26	2	25
58	ideal	razoável	0.06	3	25

59	ideal	boa	0	3	25
60	ideal	boa	0	3	25
61	ideal	boa	0.06	3	25
62	ideal	boa	0	3	25
63	ideal	boa	0	3	25

Combinação de pesos 2 - Transportes

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
		C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.5172	98.67	0.333	0.287	0	0.62	0.33	0.237	0.33	0.903	0.5	0.5	1	2.642	2.523

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.293	0.103	0	0.396	0.25	0.21	0.31	0.773	0.465	0.362	0.83	2.117	1.996	93.30

CARACTERIZAÇÃO DOS NOVOS CENTRÓIDES QUE CONSTITUEM A SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Centróide ID	X(m)	Y(m)	Z(m)	Tipo	População	Emprego	Emp. B.	Emp. NB.	Indúst.	Comer. Grde. Dist.	Comer. Serv.
37	1500	2500	133.8	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
38	2500	2500	152.5	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
39	2500	500	75.4	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
40	2500	11500	146.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
41	2500	1500	102.0	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
42	500	500	48.8	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
43	1500	3500	158.9	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
44	1500	1500	85.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
45	1500	500	57.6	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
46	500	1500	74.5	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
47	1500	7500	213.5	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
48	3500	2500	159.7	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
49	1500	4500	184.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
50	3500	1500	110.7	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
51	500	7500	185.3	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0

52	1500	11500	148.3	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
53	1500	8500	201.8	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
54	500	3500	149.4	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
55	500	2500	124.7	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
56	1500	5500	207.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
57	500	8500	176.4	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
58	1500	10500	175.4	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
59	500	12500	99.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
60	1500	12500	100.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
61	2500	12500	98.3	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
62	500	5500	178.0	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
63	500	11500	95.5	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0

Centróide ID	Avaliação do Índice de Aptidão				Densidade populacional (hab/ha)
	Inclinação	Exposição solar	Permeabilidade	Final	
37	ideal	boa	0	3	25
38	ideal	boa	0	3	25
39	ideal	boa	0	3	25
40	ideal	razoável	0.08	3	25
41	ideal	boa	0	3	25
42	fraca	boa	0	3	25
43	ideal	boa	0	3	25
44	ideal	boa	0	3	25
45	fraca	boa	0	3	25
46	ideal	boa	0	3	25
47	boa	razoável	0	3	25
48	ideal	boa	0.26	2	25
49	boa	boa	0	3	25
50	ideal	boa	0.26	2	25
51	boa	razoável	0	3	25
52	boa	boa	0.08	3	25
53	boa	razoável	0	3	25
54	ideal	boa	0	3	25
55	ideal	boa	0	3	25
56	boa	boa	0.28	2	25
57	boa	razoável	0	3	25
58	boa	razoável	0.08	3	25
59	boa	boa	0.08	3	25
60	ideal	razoável	0.08	3	25
61	ideal	razoável	0.08	3	25

62	boa	boa	0	3	25
63	boa	razoável	0.08	3	25

Combinação de pesos 3 - Abastecimento

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
		C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.4643	97.33	0.333	0.307	0	0.64	0.33	0.247	0.3	0.883	0.5	0.5	1	2.372	2.523

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.303	0.12	0	0.423	0.26	0.102	0.22	0.581	0.478	0.5	0.94	1.804	1.982	83.66

CARACTERIZAÇÃO DOS NOVOS CENTRÓIDES QUE CONSTITUEM A SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Centróide ID	X(m)	Y(m)	Z(m)	Tipo	População	Emprego	Emp. B.	Emp. NB.	Indúst.	Comer. Grde. Dist.	Comer. Serv.
37	10500	5500	200.0	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
38	10500	2500	159.2	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
39	9500	11500	208.0	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
40	9500	2500	168.4	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
41	10500	7500	233.2	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
42	10500	6500	213.6	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
43	10500	3500	192.3	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
44	11500	2500	135.6	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
45	11500	6500	201.0	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
46	9500	1500	142.8	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
47	9500	500	117.2	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
48	10500	1500	132.4	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
49	11500	7500	204.9	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
50	10500	8500	194.9	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
51	11500	1500	118.3	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
52	11500	8500	185.9	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
53	10500	500	107.3	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
54	11500	500	92.8	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0

55	10500	10500	169.8	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
56	11500	4500	159.7	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
57	6500	2500	148.6	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
58	10500	11500	198.6	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
59	11500	3500	151.9	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
60	11500	5500	159.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
61	10500	9500	150.2	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
62	6500	1500	123.6	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
63	3500	2500	159.7	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0

Centróide ID	Avaliação do Índice de Aptidão				Densidade populacional hab/ha
	Inclinação	Exposição solar	Permeabilidade	Final	
37	ideal	razoável	0.31	2	25
38	ideal	boa	0.01	3	25
39	ideal	razoável	0.01	3	25
40	ideal	boa	0.01	3	25
41	ideal	boa	0.06	3	25
42	ideal	boa	0.06	3	25
43	ideal	boa	0.01	3	25
44	ideal	boa	0.01	3	25
45	ideal	boa	0.06	3	25
46	ideal	boa	0.01	3	25
47	boa	boa	0.01	3	25
48	ideal	boa	0.01	3	25
49	ideal	boa	0.06	3	25
50	ideal	razoável	0.06	3	25
51	ideal	boa	0.01	3	25
52	ideal	razoável	0.06	3	25
53	ideal	boa	0.01	3	25
54	boa	boa	0.01	3	25
55	ideal	boa	0.14	3	25
56	ideal	boa	0.01	3	25
57	ideal	boa	0.22	3	25
58	ideal	boa	0.01	3	25
59	ideal	boa	0.01	3	25
60	ideal	razoável	0.06	3	25
61	ideal	boa	0.14	3	25
62	ideal	boa	0.22	3	25
63	ideal	boa	0.26	2	25

Combinação de pesos 4 - Drenagem

VALORES INICIAIS

Temp. inicial	Taxa de aceitação	Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo	
		C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos
0.5133	97.33	0.333	0.333	0.29	0	0.33	0.276	0.33	0.942	0.5	0.485	0.99	2.622	2.554

VALORES FINAIS

Abastecimento				Drenagem				Transportes			Função Objetivo		Tempo de execução (h)
C_A	C_{AR}	E_A	total	C_D	C_{DR}	E_D	total	C_T	T	total	Com pesos	Sem pesos	
0.278	0.183	0	0.461	0.26	0.057	0.2	0.521	0.479	0.5	0.98	1.861	1.961	99.47

CARACTERIZAÇÃO DOS NOVOS CENTRÓIDES QUE CONSTITUEM A SOLUÇÃO DE CUSTO MÍNIMO

Centróide ID	X(m)	Y(m)	Z(m)	Tipo	População	Emprego	Emp. B.	Emp. NB.	Indúst.	Comer. Grde. Dist.	Comer. Serv.
37	2500	2500	152.5	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
38	9500	2500	168.4	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
39	9500	500	117.2	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
40	10500	3500	192.3	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
41	10500	5500	200	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
42	10500	6500	213.6	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
43	10500	2500	159.2	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
44	10500	500	107.3	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
45	2500	1500	102	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
46	1500	1500	85.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
47	9500	1500	142.8	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
48	10500	1500	132.4	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
49	11500	4500	159.7	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
50	11500	2500	135.6	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
51	11500	6500	201	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
52	1500	2500	133.8	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
53	1500	6500	216.5	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
54	2500	500	75.4	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
55	11500	1500	118.3	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
56	11500	5500	159.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0

57	11500	500	92.8	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
58	11500	3500	151.9	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
59	1500	3500	158.9	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
60	500	2500	124.7	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
61	500	3500	149.4	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
62	500	1500	74.5	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0
63	1500	4500	184.1	Residencial	2500	500	0	500	0	0	0

Avaliação do Índice de Aptidão				Densidade populacional hab/ha
Inclinação	Exposição solar	Permeabilidade	Final	
ideal	boa	0	3	25
ideal	boa	0.01	3	25
boa	boa	0.01	3	25
ideal	boa	0.01	3	25
ideal	razoável	0.31	2	25
ideal	boa	0.06	3	25
ideal	boa	0.01	3	25
ideal	boa	0.01	3	25
ideal	boa	0	3	25
ideal	boa	0	3	25
ideal	boa	0.01	3	25
ideal	boa	0.01	3	25
ideal	boa	0.01	3	25
ideal	boa	0.01	3	25
ideal	boa	0.01	3	25
ideal	boa	0.06	3	25
ideal	boa	0	3	25
boa	boa	0	3	25
ideal	boa	0	3	25
ideal	boa	0.01	3	25
ideal	razoável	0.06	3	25
boa	boa	0.01	3	25
ideal	boa	0.01	3	25
ideal	boa	0	3	25
ideal	boa	0	3	25
ideal	boa	0	3	25
boa	boa	0	3	25