

DIMENSIONAMENTO FIÁVEL DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA COM O WATERNETGEN

João MURANHO^{1,4}; Joaquim SOUSA^{2,4}; Alfeu Sá MARQUES^{3,4}

RESUMO

Os sistemas de abastecimento de água prestam um serviço essencial, razão pela qual há que ter os devidos cuidados no seu planeamento para assegurar o serviço a preços acessíveis e de forma fiável. Porém, estes dois critérios (minimização do custo e aumento da fiabilidade) são antagónicos, ou seja, mais fiabilidade implica mais custo e custo mínimo corresponde a baixa fiabilidade. Perante este cenário, os projetistas deverão procurar soluções que estabeleçam compromissos razoáveis entre ambos, ou seja, soluções que apresentem bons níveis de fiabilidade com custos comportáveis.

A fiabilidade de uma rede de distribuição de água (RDA) é algo que não é fácil de apurar, razão pela qual é usual recorrer a medidas de avaliação indiretas. Embora este procedimento não seja o mais correto, uma vez que são conhecidas algumas debilidades destas medidas indiretas, a sua simplicidade e rapidez de cálculo torna-o bastante atrativo.

Nesta comunicação apresenta-se uma ferramenta informática (WaterNetGen) desenvolvida para o dimensionamento de RDA que possibilita a adoção de critérios de fiabilidade, em simultâneo com o fator custo, e a sua versatilidade é demonstrada através de um exemplo hipotético que serve para ilustrar o dimensionamento económico e as potencialidades de adotar alguns critérios de fiabilidade publicados na literatura da especialidade.

Palavras-chave: redes de distribuição de água, dimensionamento, fiabilidade, otimização, WaterNetGen.

1 - Prof. Auxiliar no Departamento de Informática, UBI, jmuranho@ubi.pt

2 - Prof. Adjunto no Departamento de Engenharia Civil, ISEC do IPC, jjoseng@isec.pt

3 - Prof. Auxiliar no Departamento de Engenharia Civil, FCT da UC, jasm@dec.uc.pt

4 - MARE - Centro de Ciências do Mar e do Ambiente, FCT da Universidade de Coimbra

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de abastecimento de água desempenham um papel fundamental nas sociedades modernas, sendo as redes de distribuição de água (RDA) a sua parte mais visível para os utilizadores finais. Como se trata da prestação de um serviço essencial, há que ter os devidos cuidados no seu planeamento para assegurar o serviço a preços acessíveis e, simultaneamente, garantir a fiabilidade do mesmo, não só em condições normais de funcionamento mas também perante cenários críticos, de que são exemplos a ocorrência de incêndios, consumos anormalmente elevados ou roturas de condutas. Porém, tratando-se de infraestruturas cuja construção envolve investimentos elevados, há que otimizar os seus custos logo na fase de projeto, procurando identificar soluções que prestem bons níveis de serviço ao menor custo. Ora, estes dois critérios (minimização do custo e aumento da fiabilidade) são antagónicos, ou seja, mais fiabilidade implica custo mais elevado e a solução de custo mínimo corresponde a baixa fiabilidade. Perante este cenário, os projetistas deverão procurar soluções que estabeleçam compromissos razoáveis entre ambos, ou seja, soluções que apresentem bons níveis de fiabilidade com custos comportáveis.

O dimensionamento económico de RDA é um problema sobre o qual a comunidade científica se tem debruçado nas últimas 4 décadas, e na literatura da especialidade pode encontrar-se uma vasta diversidade de abordagens, baseadas em diferentes metodologias, desde os métodos de otimização tradicionais, como a programação linear - ALPEROVITS e SHAMIR (1977), programação não linear - FUJIWARA e KHANG (1990) e programação dinâmica - LIANG (1971); às heurísticas modernas, muitas delas inspiradas em processos que ocorrem na natureza, de que são exemplos o recozimento simulado ou *Simulated Annealing* - CUNHA e SOUSA (1999), os algoritmos genéticos - SAVIC e WALTERS (1997), as colónias de formigas - MAIER *et al.* (2003), a pesquisa tabu - CUNHA e RIBEIRO (2004), entre outros. Porém, atendendo a que a minimização do custo tende a eliminar as redundâncias, este tipo de abordagem conduz, em geral, a soluções de fiabilidade reduzida.

A fiabilidade das RDA refere-se à capacidade de satisfazer os consumos requeridos em condições de pressão que satisfaçam os mínimos exigidos, e o ideal seria conseguir soluções que garantissem níveis de serviço razoáveis mesmo perante cenários críticos. Porém, a ser alcançável, isso implicaria investimentos incomportáveis. Coloca-se, então, a seguinte questão: até que ponto é que será viável aumentar o investimento para reduzir o risco?

Por outro lado, a fiabilidade de uma RDA é algo que não é fácil de avaliar. O ideal seria simular todas as possibilidades de cenários críticos e, com base nos resultados, apurar o nível de fiabilidade. Porém, tal procedimento é computacionalmente inaceitável, razão pela qual é usual recorrer a medidas indiretas da fiabilidade. Embora este procedimento não seja o mais correto, uma vez que são conhecidas algumas debilidades destas medidas indiretas, a sua simplicidade e rapidez de cálculo torna-o bastante atrativo.

Nesta comunicação apresenta-se uma ferramenta informática desenvolvida para o dimensionamento de RDA que permite lidar tanto com redes novas como com reforço/ampliação de redes existentes. Esta ferramenta tem por base um modelo de otimização que é resolvido com um algoritmo de *Simulated Annealing*. O modelo de otimização desenvolvido permite determinar a solução de custo mínimo (em geral de baixa fiabilidade) ou a solução mais fiável (possibilitando a avaliação com várias medidas indiretas da fiabilidade) sujeita a um limite de custo máximo. A consideração de diferentes níveis de custo máximo permite obter uma aproximação à fronteira de Pareto entre os dois objetivos: custo vs. fiabilidade. O dimensionamento das condutas é efetuado a partir de catálogos definidos pelo utilizador, podendo o mesmo fixar restrições a vários níveis, nomeadamente: diâmetro mínimo, velocidade mínima, velocidade máxima (valor fixo ou em função do respetivo diâmetro interior), pressão mínima (valor fixo ou em função do número de pisos acima do solo), pressão máxima e máxima variação de pressão.

Toda esta metodologia está implementada num software amigável, de utilização fácil e intuitiva, que permite rapidamente obter soluções realistas e de boa qualidade - WaterNetGen. Este software é baseado no mundialmente conhecido EPANET e pode ser obtido gratuitamente no seguinte endereço: <http://www.dec.uc.pt/~WaterNetGen/>

A aplicação desta metodologia, bem como a versatilidade da ferramenta que a suporta, é demonstrada através de um exemplo hipotético que serve para ilustrar o dimensionamento económico e as potencialidades de adotar alguns critérios de fiabilidade publicados na literatura da especialidade, bem como avaliar a sua eficácia.

2. DIMENSIONAMENTO FIÁVEL DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

No contexto do dimensionamento de RDA, tradicionalmente, o aumento da fiabilidade consegue-se através da aplicação de algumas regras empíricas, nomeadamente: incluir condutas redundantes de modo a formar malhas, atribuir às condutas diâmetros superiores aos mínimos necessários e manter algum equilíbrio de diâmetros dentro de cada malha. No contexto do dimensionamento ótimo, nas últimas três décadas surgiram várias abordagens à questão da fiabilidade, tendo resultado num conjunto de metodologias, cujo objetivo é obter soluções que representem bons equilíbrios entre economia e fiabilidade. Mas a fiabilidade de uma RDA não é fácil de quantificar eficazmente de forma célere, razão pela qual surgiram várias medidas indiretas para o fazer, às quais iremos chamar índices de fiabilidade.

2.1. Entropia

A quantificação da fiabilidade de RDA através do conceito de entropia assenta nos seguintes princípios: é desejável que exista mais do que uma conduta incidente em cada nó (condição topológica) e as condutas incidentes em cada nó devem apresentar caudais semelhantes (condição de capacidade). Este critério foi inicialmente proposto por AWUMAH *et al.* (1991), mas foram TANYIMBOH e TEMPLEMAN (1993) que propuseram a forma de calcular a entropia em RDA ainda hoje adotada, a qual foi posteriormente manipulada matematicamente por WALTERS (1995) que derivou uma expressão consideravelmente mais simples:

$$\frac{E}{K} = - \sum_{ij \in \{TF\}} \frac{Q_{ij}}{QT_0} \times \ln \left(\frac{Q_{ij}}{QT_0} \right) + \sum_{n=1}^N \frac{QS_n}{QT_0} \times \ln \left(\frac{QS_n}{QT_0} \right) \quad (1)$$

em que:

E - entropia

K - constante positiva (neste contexto não tem qualquer significado sendo habitual designar por entropia da rede o quociente E/K)

N - número de nós de junção existentes na rede

Q_{ij} $\begin{cases} i=0 \text{ e } j \neq 0 - \text{caudal externo que entra no nó } j \\ i \neq 0 \text{ e } j=0 - \text{caudal externo que sai do nó } j \\ i \neq 0 \text{ e } j \neq 0 - \text{caudal da conduta que liga os nós } i \text{ e } j \end{cases}$

QT_0 - abastecimento ou consumo total da rede

QS_n - caudal que sai do nó n , incluindo o respetivo consumo

TF - totalidade dos caudais da rede, isto é, engloba os caudais que circulam nas condutas e os caudais externos, tanto os que abastecem como os que são abastecidos pela rede.

Este critério de avaliação da fiabilidade de redes de distribuição de água possui duas características que o tornam bastante apelativo, nomeadamente: é pouco exigente ao nível da sua quantificação e pode ser facilmente inserido em modelos de otimização (maximização da entropia dos caudais). Pela negativa, destaca-se o facto de não ter em consideração os diâmetros das condutas, podendo conduzir a soluções com caudais equilibrados mas grande desproporção de diâmetros confluentes no mesmo nó, o que em nada contribui para a fiabilidade das RDA. Para tentar contornar este inconveniente, LIU *et al.* (2014) propuseram uma nova forma de calcular a entropia de RDA (entropia sensível aos diâmetros), desta vez procurando incluir, se bem que de forma indireta através da velocidade de escoamento, os diâmetros das condutas:

$$\frac{E}{K} = - \sum_{j \in NR} \frac{Q_j}{QT_0} \times \ln \left(\frac{Q_j}{QT_0} \right) - \frac{1}{QT_0} \sum_{i=1}^N QT_i \left[\frac{Q_i}{QT_i} \times \ln \left(\frac{Q_i}{QT_i} \right) + \sum_{i \in ND_i} \frac{C}{V_{ij}} \times \frac{q_{ij}}{QT_i} \times \ln \left(\frac{q_{ij}}{QT_i} \right) \right] \quad (2)$$

em que:

- Q_j - caudal fornecido pelo reservatório *j*
- NR - número de reservatórios que abastecem a rede
- QT_i - caudal a entrar no nó *i*
- Q_i - consumo do nó *i*
- ND_i - número de condutas a sair do nó *i*
- C - velocidade arbitrária constante (por exemplo, 1 m/s)
- V_{ij} - velocidade na conduta que une os nós *i* e *j*
- q_{ij} - caudal na conduta que une os nós *i* e *j*

No entanto, a correção introduzida apenas afeta os caudais à saída dos nós, o que não parece fazer muito sentido, uma vez que o objetivo é assegurar o abastecimento dos nós e isso melhora é com a uniformização dos diâmetros à sua entrada e não à saída.

2.2. Resiliência

O índice de resiliência (*I_r*), proposto por Todini (2000), baseia-se no princípio de que quanto maiores forem as folgas de pressão nos nós (diferenças entre as pressões observadas e as mínimas exigidas) melhor será a resposta da RDA a cenários críticos (maior fiabilidade). Assim, o índice de resiliência acaba por representar o quociente entre o excesso de potência existente na rede (consumos multiplicados pelas folgas de pressão) e o excesso de potência fornecida à rede (potência fornecida pelos reservatórios e bombas deduzida da potência correspondente à satisfação dos consumos à pressão mínima exigida):

$$I_r = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i \times (H_i - H_i^*)}{\sum_{j=1}^{NR} Q_j \times H_j + \sum_{k=1}^{NB} Q_k \times H_k - \sum_{i=1}^N Q_i \times H_i^*} \quad (3)$$

em que:

- H_j - cota piezométrica do nó *i*
- H_i^{*} - cota piezométrica correspondente à pressão mínima exigida no nó *i*
- NR - número de reservatórios que abastecem a rede
- H_j - cota piezométrica do reservatório *j*
- NB - número de bombas existentes na rede
- Q_k - caudal da bomba *k*
- H_k - altura de elevação da bomba *k*

No fundo, o índice de resiliência pesa o efeito negativo das perdas de energia sofridas ao longo dos percursos da água (por exemplo, numa RDA sem perdas de energia o índice de resiliência seria máximo, ou seja, igual à unidade). Mas o facto de não ter em conta questões topológicas da rede nem de capacidade das condutas fragiliza-o como medida para avaliar indiretamente a fiabilidade de uma RDA. Para tentar minimizar este inconveniente, PRASAD e PARK (2004) introduziram na fórmula original coeficientes de uniformização dos diâmetros das condutas ligadas a cada nó, do que resultou o índice de resiliência da rede (I_n):

$$I_n = \frac{\sum_{i=1}^N C_i \times Q_i \times (H_i - H_i^*)}{\sum_{j=1}^{NR} Q_j \times H_j + \sum_{k=1}^{NB} Q_k \times H_k - \sum_{i=1}^N Q_i \times H_i^*} \quad \text{com} \quad C_i = \frac{\sum_{j=1}^{NC_i} D_j}{NC_i \times \max\{D_j\}} \quad (4)$$

em que:

- C_j – coeficiente de uniformidade de diâmetros do nó j
- D_j – diâmetro da conduta j

Todavia, esta não parece ser a forma ideal de proceder à correção pretendida, pois a fiabilidade de uma RDA está relacionada com a uniformidade de diâmetros dentro de cada malha e não na uniformidade de diâmetros das condutas ligadas a um nó (e entrar e a sair).

3. METODOLOGIA

Para avaliar a eficácia das medidas indiretas de avaliação da fiabilidade de RDA apresentadas no capítulo anterior, o cálculo dessas medidas foi implementado no software WaterNetGen, uma extensão do EPANET (MURANHO *et al.* (2012) e (2016)). O software foi adaptado de modo a permitir duas formas distintas de utilização dos índices de fiabilidade: 1) avaliação dos índices de fiabilidade (entropia – E , entropia sensível aos diâmetros – E_{SD} , índice de resiliência – I_r e índice de resiliência da rede – I_n) para qualquer modelo de rede introduzido no software; 2) dimensionamento otimizado considerando a maximização de qualquer um dos índices de fiabilidade sujeito a um limite máximo de custo. No primeiro caso basta efetuar uma simulação do modelo da rede para obter as grandezas hidráulicas necessárias (caudais, velocidades, cotas piezométricas e pressões) e de seguida solicitar o cálculo de todos os índices de fiabilidade implementados. Para o dimensionamento é necessário indicar qual o índice de fiabilidade a usar na função objetivo e o limite máximo de custo permitido, podendo este ser um valor fixo ou uma percentagem do custo da solução corrente. O dimensionamento otimizado é feito com base no modelo de otimização apresentado na secção 3.1, que é resolvido recorrendo ao algoritmo de *Simulated Annealing* apresentado na secção 3.2.

Como um dos objetivos deste trabalho é avaliar a eficácia dos índices de fiabilidade, implementou-se no software WaterNetGen um procedimento para avaliar a fiabilidade que se aproxima do objetivo real, o que neste caso se traduz em: até que ponto a RDA é capaz de satisfazer os consumos requeridos mesmo perante cenários de rotura de uma qualquer conduta? Este procedimento consiste em simular o comportamento da rede admitindo que uma conduta está fora de serviço (está fechada). Esta simulação tem a particularidade de ser executada pelo módulo de simulação controlada pela pressão do WaterNetGen, podendo assim estimar-se que parte dos consumos requeridos é que poderão ser efetivamente satisfeitos. De modo a avaliar a fiabilidade da RDA no seu todo, simulam-se todas as possibilidades de ocorrer uma conduta fechada (tantas simulações quantas as condutas). Em cada simulação avalia-se o rácio de satisfação dos consumos (DSR, quociente entre os consumos que é possível satisfazer e os consumos requeridos) e a fiabilidade global da RDA é dada pela média desses rácios.

3.1 Modelo de otimização

O modelo de otimização adotado consiste em maximizar um dos critérios de fiabilidade sujeito às habituais restrições hidráulicas (equações que traduzem o comportamento hidráulico da RDA e limitações de projeto), às quais se adiciona uma restrição de custo máximo, do que resulta:

$$\text{Maximizar (Índice de fiabilidade)} \quad (5)$$

sujeito a

$$\sum_{j=1}^{NC} I_{ij} \times Q_j = QC_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$\Delta H_j = \frac{10.674 L_j}{C_{HWj}^{1.852} \times D_j^{4.87}} \times Q_j^{1.852} \quad j = 1, 2, \dots, NC \quad (7)$$

$$H_i \geq H_{i,\min} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

$$D_j = \sum_{i=1}^{ND_j} YD_{j,i} \times DC_{j,i} \quad \text{com} \quad \sum_{i=1}^{ND_j} YD_{j,i} = 1 \quad j = 1, 2, \dots, NC \quad (9)$$

$$V_j \geq V_{j,\max}(D_j) \quad j = 1, 2, \dots, NC \quad (10)$$

$$\text{Custo} = \sum_{j=1}^{NC} C_{\text{cond},j}(D_j) \times L_j \leq \text{Custo}_{\text{máximo}} \quad (11)$$

em que:

- NC- número de condutas existentes na rede
- N - número de nós de junção existentes na rede
- L_j - comprimento da conduta j
- D_j - diâmetro da conduta j
- $DC_{j,1}, DC_{j,2}, \dots, DC_{j,ND_j}$ - série de diâmetros comerciais atribuída à conduta j
- ND_j - número de diâmetros comerciais da série atribuída à conduta j
- $YD_{j,i}$ - variáveis binárias que identificam o diâmetro comercial ótimo da conduta j
- $C_{\text{cond},j}(D_j)$ - custo unitário da conduta j em função do respetivo diâmetro (€/m)
- I - matriz de incidência da rede ($N \times NC$)
- Q_j - caudal escoado no troço j
- ΔH_j - perda de carga contínua na conduta j
- C_{HWj} - coeficiente de Hazen-Williams da conduta j
- QC_i - consumo do nó i
- H_i - cota piezométrica do nó i
- $H_{i,\min}$ - cota piezométrica mínima exigida para o nó i
- V_j - velocidade do escoamento na conduta j
- $V_{j,\max}$ - velocidade do escoamento máxima permitida na conduta j , função do seu diâmetro

3.2 Simulated Annealing

O *Simulated Annealing* é um método probabilístico proposto inicialmente por Kirkpatrick *et al.* (1983) para otimizar uma função objetivo que pode possuir vários ótimos locais, tendo sido inspirado no processo físico de recozimento. À temperatura inicial (T_0), o algoritmo começa por gerar uma solução inicial (X_0), que no presente caso corresponde a atribuir um diâmetro a cada conduta a otimizar (neste caso optou-se pela solução de custo mínimo, também obtida com o algoritmo de

Simulated Annealing). Nas seguintes temperaturas a função objetivo é maximizada para obter a solução à qual corresponde o maior valor do índice de fiabilidade selecionado (dentro do limite de custo indicado). O número de soluções candidatas (L_k) geradas a cada temperatura (T_k) varia de acordo com a percentagem de soluções aceites na temperatura anterior (Pa_{k-1}). Cada nova solução candidata é gerada a partir da solução atual, aplicando a seguinte sequência: 1) selecionar aleatoriamente uma das condutas a otimizar; e 2) ajustar o diâmetro dessa conduta, podendo este aleatoriamente subir ou descer uma posição no catálogo adotado. Para cada solução, executa-se uma simulação controlada pelo consumo (simulador original do EPANET) para prever o comportamento hidráulico da rede, avaliando-se de seguida o respetivo valor da função objetivo dessa solução (índice de fiabilidade). A nova solução é aceite ou não, de acordo com o critério de Metropolis. Se é aceite, esta solução torna-se a nova solução corrente e será usada para produzir a próxima solução candidata. Se não, utiliza-se a solução corrente atual. O algoritmo termina quando se atinge o critério de paragem, ou seja, para duas temperaturas sucessivas, o número de soluções aceites permanece inferior a 5% e não houve melhoria (Quadro 1), Sousa (2006).

Quadro 1 – Esquema de arrefecimento para o algoritmo de *Simulated Annealing*

Solução inicial	$X_0 = \{D_1, D_2, \dots, D_{N_{cond}}\}$; onde N_{cond} é o nº de condutas a otimizar																				
Temperatura inicial	$T_0 = \left(\frac{0.10 \times \text{Índice de fiabilidade}}{\ln(Pa_0)} \right)$; onde $Pa_0 = 80\%$																				
Número de transições a cada temperatura	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">se $Pa_k > 70\%$</td> <td style="width: 15%;">então $T_{k+1} = 0.50 \times T_k$</td> <td style="width: 15%;">e</td> <td style="width: 55%;">$L_{k+1} = 10 \times N_{cond}$</td> </tr> <tr> <td>se $50\% < Pa_k \leq 70\%$</td> <td>então $T_{k+1} = 0.60 \times T_k$</td> <td>e</td> <td>$L_{k+1} = 20 \times N_{cond}$</td> </tr> <tr> <td>se $35\% < Pa_k \leq 50\%$</td> <td>então $T_{k+1} = 0.70 \times T_k$</td> <td>e</td> <td>$L_{k+1} = 30 \times N_{cond}$</td> </tr> <tr> <td>se $20\% < Pa_k \leq 35\%$</td> <td>então $T_{k+1} = 0.80 \times T_k$</td> <td>e</td> <td>$L_{k+1} = 40 \times N_{cond}$</td> </tr> <tr> <td>se $Pa_k \leq 20\%$</td> <td>então $T_{k+1} = 0.90 \times T_k$</td> <td>e</td> <td>$L_{k+1} = 50 \times N_{cond}$</td> </tr> </table>	se $Pa_k > 70\%$	então $T_{k+1} = 0.50 \times T_k$	e	$L_{k+1} = 10 \times N_{cond}$	se $50\% < Pa_k \leq 70\%$	então $T_{k+1} = 0.60 \times T_k$	e	$L_{k+1} = 20 \times N_{cond}$	se $35\% < Pa_k \leq 50\%$	então $T_{k+1} = 0.70 \times T_k$	e	$L_{k+1} = 30 \times N_{cond}$	se $20\% < Pa_k \leq 35\%$	então $T_{k+1} = 0.80 \times T_k$	e	$L_{k+1} = 40 \times N_{cond}$	se $Pa_k \leq 20\%$	então $T_{k+1} = 0.90 \times T_k$	e	$L_{k+1} = 50 \times N_{cond}$
se $Pa_k > 70\%$	então $T_{k+1} = 0.50 \times T_k$	e	$L_{k+1} = 10 \times N_{cond}$																		
se $50\% < Pa_k \leq 70\%$	então $T_{k+1} = 0.60 \times T_k$	e	$L_{k+1} = 20 \times N_{cond}$																		
se $35\% < Pa_k \leq 50\%$	então $T_{k+1} = 0.70 \times T_k$	e	$L_{k+1} = 30 \times N_{cond}$																		
se $20\% < Pa_k \leq 35\%$	então $T_{k+1} = 0.80 \times T_k$	e	$L_{k+1} = 40 \times N_{cond}$																		
se $Pa_k \leq 20\%$	então $T_{k+1} = 0.90 \times T_k$	e	$L_{k+1} = 50 \times N_{cond}$																		
Critério de paragem	$Pa_k < 5\%$ (em duas temperaturas sucessivas sem melhoria)																				

4. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso refere-se a uma RDA hipotética que servirá para avaliar o desempenho dos indicadores de fiabilidade anteriormente referidos. Esta RDA é dimensionada adotando diferentes critérios, considerando diferentes limites de investimento e usando os diversos indicadores de fiabilidade. As principais características da RDA são as seguintes: é constituída por 24 condutas, 16 nós de junção à cota 0m e é abastecida graviticamente por um único reservatório à cota 40m (Figura 1); serve 20,000 habitantes, com uma capitação de 150 litros/habitante/dia, o fator de ponta instantâneo é de 2.5, as perdas de água totalizam 20% do caudal médio diário e o caudal total de dimensionamento é de 93.750L/s (Figura 2). A rede será dimensionada admitindo que terá de servir edifícios com 5 pisos acima do solo, pelo que será exigida uma pressão mínima de 300kPa ou 30.592m c.a. (Figura 2), considerando condutas em Ferro Fundido Dúctil (Figura 3), com o diâmetro mínimo de 80mm.

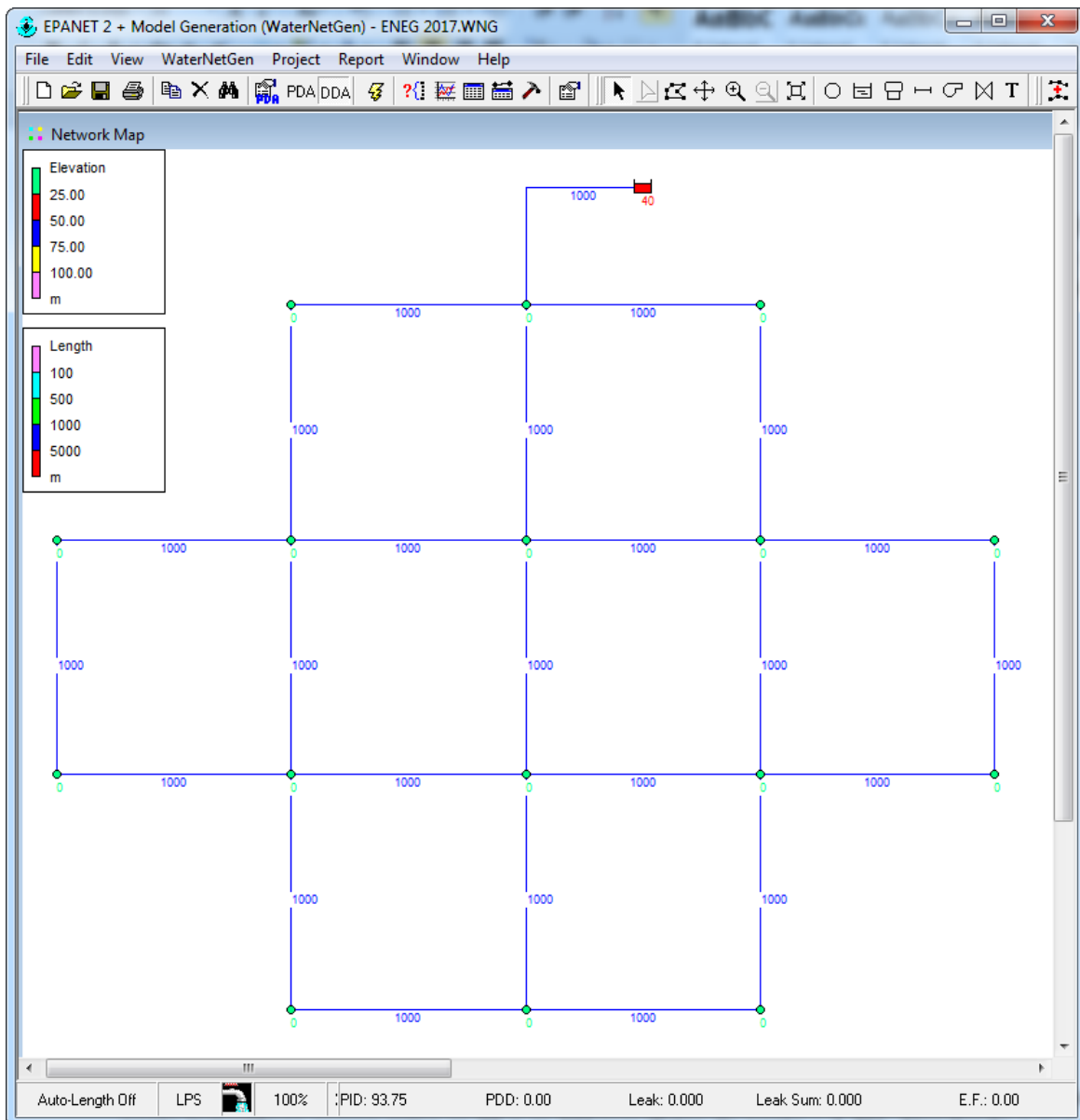


Figura 2 – Rede de distribuição de água do estudo de caso (comprimentos e cotas topográficas)

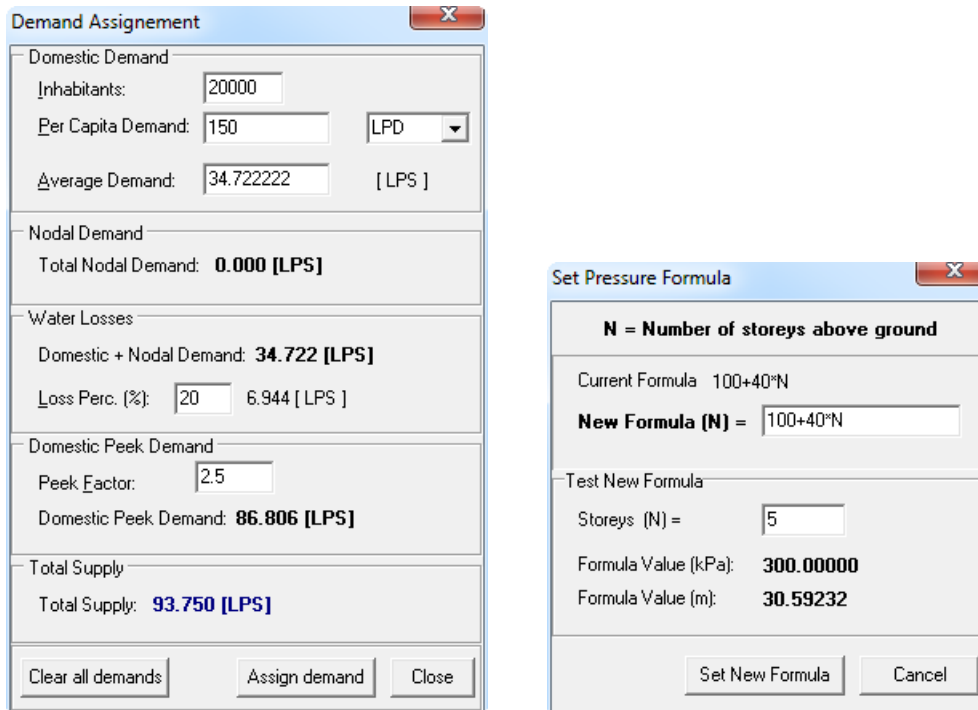


Figura 2 – Cálculo do caudal de dimensionamento e definição da pressão mínima

The 'Pipe Catalogue' window displays the following data:

Units System: SI | Diameters in millimeters

Roughness formula:

- Hazen-Williams
- Darcy-Weisbach
- Chezy-Manning

ID	Description	Commercial= Internal?	Roughness Hazen-Williams	Roughness (mm) Darcy-Weisbach	Roughness Chezy-Manning
PVC10	Polyvinyl Chloride Shelf and Tag	N	140.000000	0.005000	0.015000
HDPE	High-density polyethylene (HDPE)	N	140.000000	0.004000	0.015000
FIBRO	Fibrocimento	Y	120.000000	1.000000	0.012000
FFD	Ductile iron pipe	Y	120.000000	0.850000	0.012000

Pipe Classes for Pipe Type: FFD

ID	Description
K9	Classe K9

Pipe Diameters for Pipe Type/Class :FFD/K9

Commercial Diameter	Wall Thickness	Price	H-W	D-W (mm)	C-M	Internal Diameter	Max. Allowed Velocity (m/s)	Max. Allowed Flow (m ³ /s)
60.00	6.00	33.820				60.00	0.653	0.0018
80.00	6.00	36.730				80.00	0.733	0.0037
100.00	6.10	43.910				100.00	0.801	0.0063
125.00	6.20	53.900				125.00	0.876	0.0108
150.00	6.30	69.700				150.00	0.942	0.0167
200.00	6.40	87.660				200.00	1.057	0.0332
250.00	6.80	118.770				250.00	1.156	0.0567
300.00	7.20	145.720				300.00	1.244	0.0879
350.00	7.70	180.640				350.00	1.323	0.1272
400.00	8.10	205.660				400.00	1.395	0.1753
450.00	8.60	244.170				450.00	1.462	0.2326
500.00	9.00	282.590				500.00	1.525	0.2995

Figura 3 – Catálogo usado no dimensionamento

Numa primeira fase utilizou-se o algoritmo de *Simulated Annealing* para dimensionar a RDA com o critério de menor custo (“Min. (Least) Cost”), tendo-se optado por considerar todas as condutas com diâmetro igual a 500mm na solução inicial (“Set to Max. From Catalog”). Ao fim de aproximadamente 17 minutos de execução foi devolvida a solução do problema de otimização, à qual corresponde um custo de 1,614,670€. Esta solução não apresenta qualquer violação das restrições de dimensionamento, pelo que cumpre a pressão mínima em todos os nós e a velocidade máxima em todas as condutas (Figura 4).

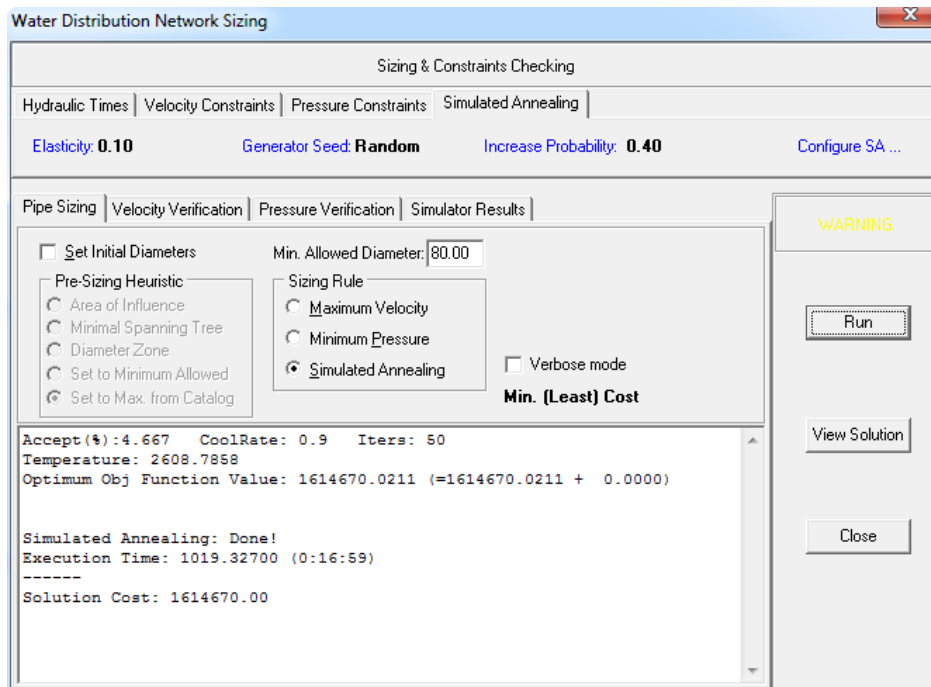


Figura 4 – Módulo de dimensionamento com apresentação do resultado final (custo mínimo)

Como a topologia desta RDA é simétrica, a solução de custo mínimo também apresenta simetria de diâmetros. Usando-se o procedimento para avaliação da fiabilidade global da rede implementado no WaterNetGen (simulações com todas as condutas fora de serviço, uma de cada vez) obteve-se o valor de 0.909 – Quadro 2, ou seja, mesmo perante situações de rotura esta solução, em média, será capaz de satisfazer cerca de 90% dos consumos requeridos. O valor mais baixo de fiabilidade é zero e corresponde à simulação da conduta 3 fora de serviço (conduta que sai do reservatório), o que é óbvio, pois neste caso não há qualquer possibilidade de abastecimento. O segundo valor mais baixo (0.245) corresponde à conduta 4, que é, igualmente, uma conduta estruturante desta rede, pelo que também não é de estranhar. Todos os restantes são superiores a 0.9, havendo mesmo alguns a atingir o máximo (1.0), ou seja, mesmo com estas condutas fora de serviço (8, 9, 23 e 24) a rede seria capaz de satisfazer a totalidade dos consumos requeridos. Esta situação também é fácil de explicar, pois trata-se de condutas de extremidade às quais foi atribuído o diâmetro mínimo (Figura 5).

Quadro 2 – Cálculo da fiabilidade global da solução de custo mínimo

Fiabilidade global = 0.909																								
Conduta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Fiabilidade	0.995	0.995	0.000	0.245	0.926	0.926	0.979	1.000	1.000	0.999	0.998	0.862	0.998	0.979	0.999	0.997	0.997	0.997	0.997	0.939	0.992	0.992	1.000	1.000

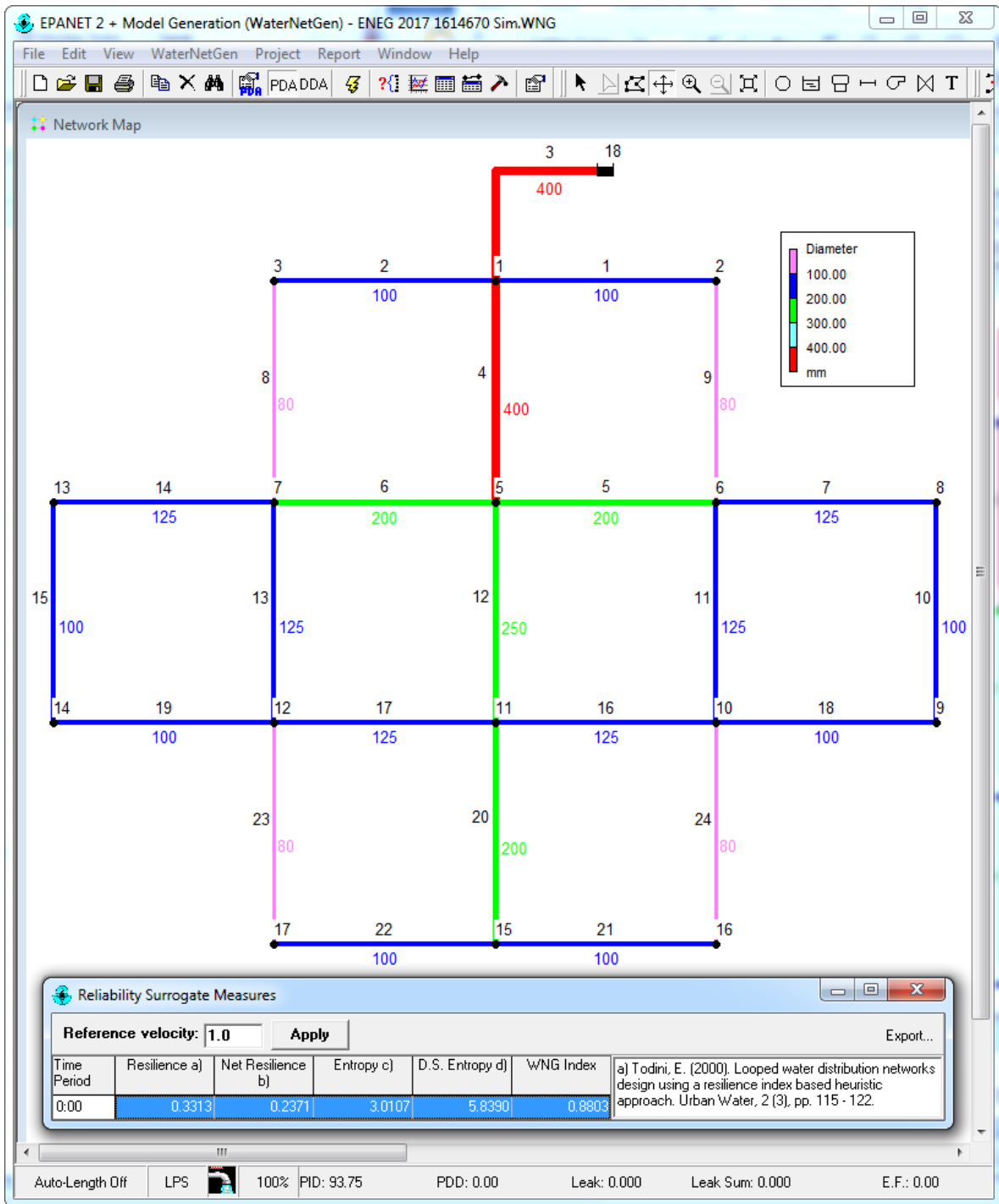


Figura 5 – Solução de custo mínimo e respetivos índices de fiabilidade

De seguida procedeu-se novamente ao dimensionamento da RDA, mas agora considerando a maximização dos índices de fiabilidade, sujeita a um custo que não exceda o custo mínimo em mais de 10%, ou seja, o custo terá de ser inferior a 1,776,137€. Os resultados obtidos apresentam-se nas Figuras 6 a 8, onde se podem observar: o custo da solução, os diâmetros das condutas e os índices de fiabilidade. Curiosamente, a solução encontrada com maior valor do índice de resiliência é, simultaneamente, a que apresenta o índice de resiliência da rede (Net Resilience) mais elevado.

Solution cost: 1,772,530€

Resilience a)	Net Resilience b)	Entropy c)	D.S. Entropy d)
0.3626	0.2943	3.3951	6.4595

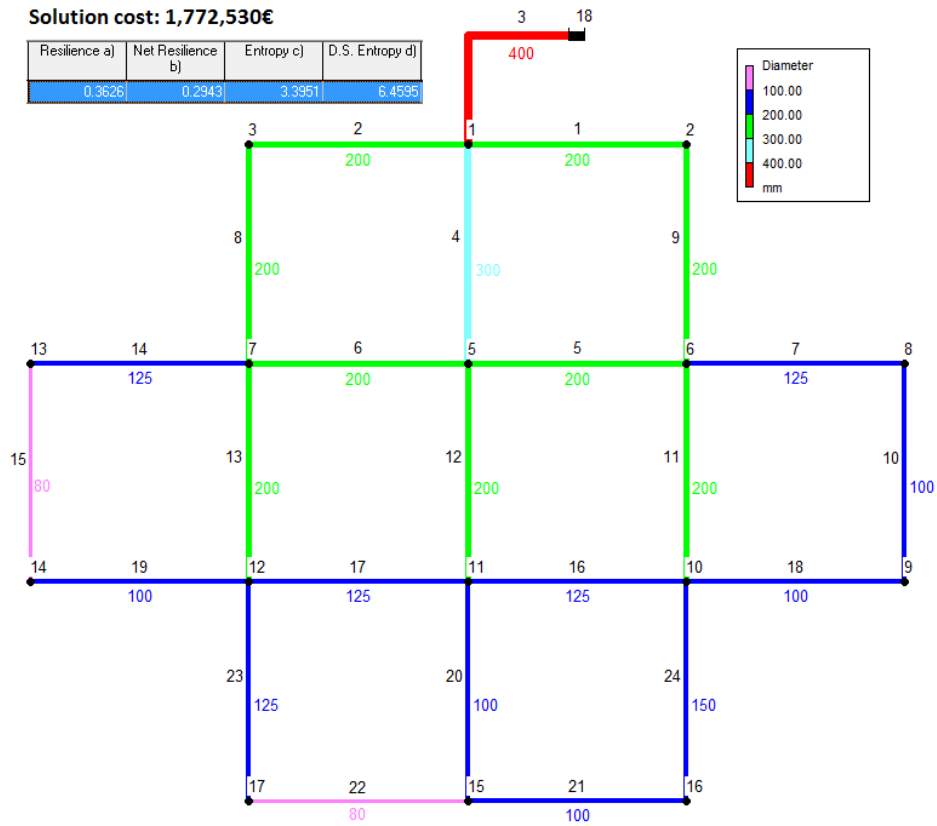


Figura 6 – Solução de maximização da entropia

Solution cost: 1,770,780€

Resilience a)	Net Resilience b)	Entropy c)	D.S. Entropy d)
0.3511	0.2443	2.9464	12.7086

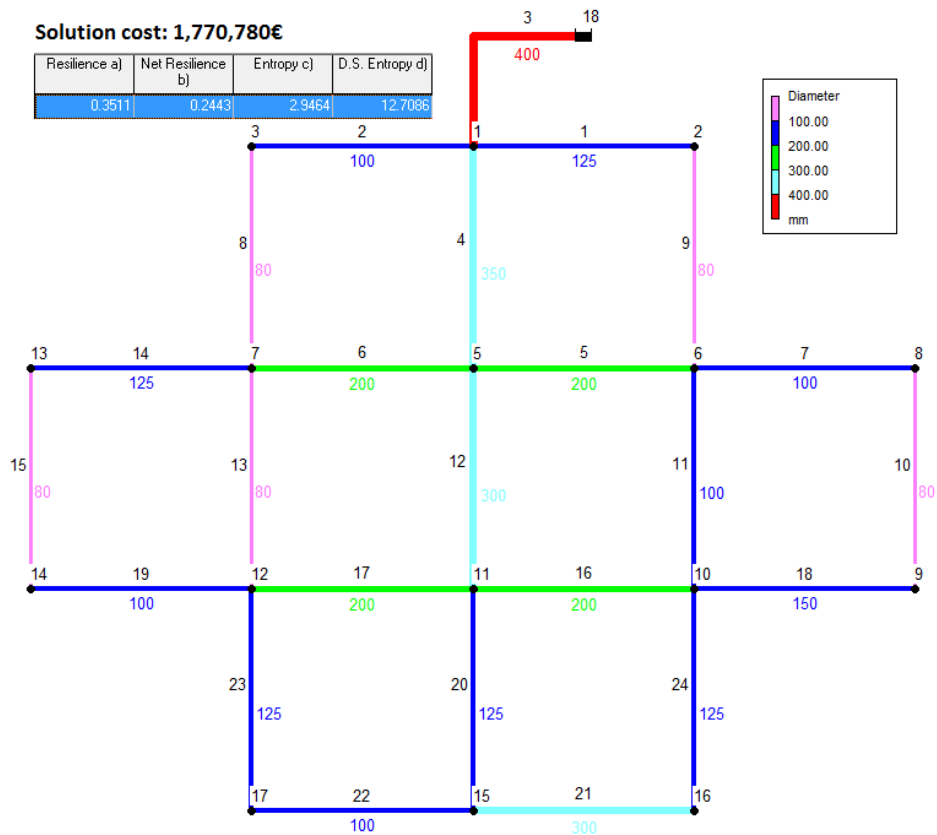


Figura 7 – Solução de maximização da entropia sensível ao diâmetro

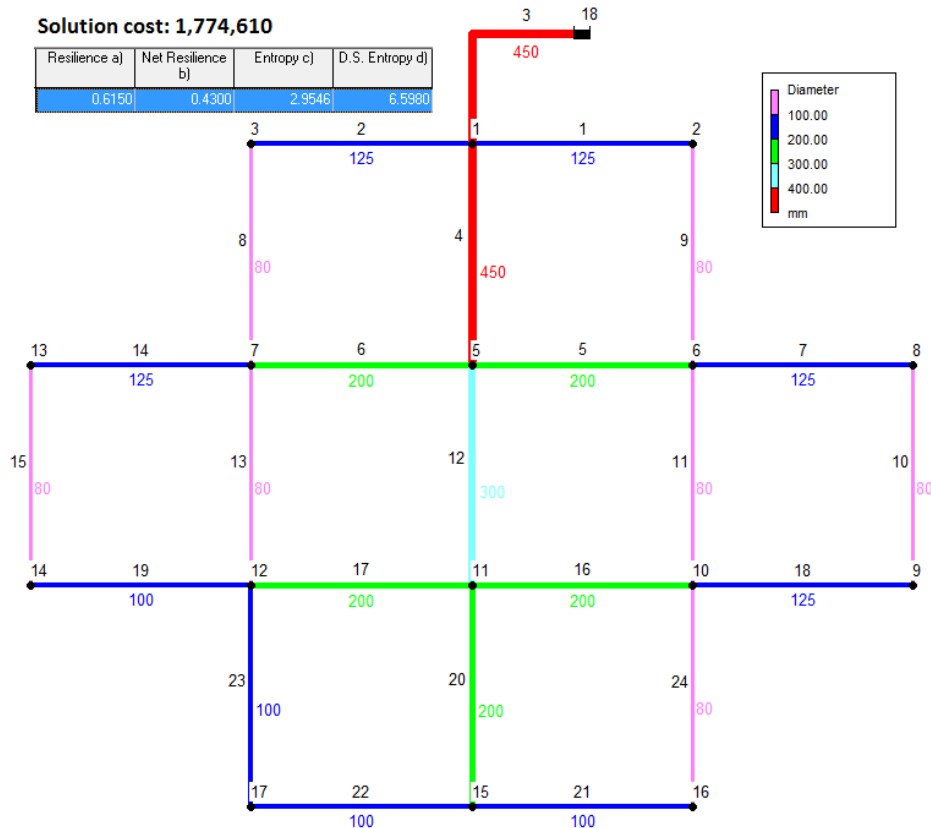


Figura 8 – Solução de maximização do índice de resiliência e da da resiliência da rede

No Quadro 3 apresentam-se todos os índices de fiabilidade calculados para as soluções obtidas. Analisando estes valores conclui-se que, aparentemente, nem todos apontam no mesmo sentido, isto é, a maximização de um dos índices não implica necessariamente a melhoria dos restantes.

Quadro 3 – Comparação dos índices de fiabilidade das várias soluções obtidas

		Valor de cada índice de fiabilidade				Custo
		Entropia	Entropia Sens. Diam.	Índice de resiliência	Resiliência da rede	
Custo mínimo		3.0107	5.8390	0.3313	0.2371	1 614 670 €
Maximizar	Entropia	3.3951	6.4595	0.3626	0.2943	1 772 530 €
	Entropia Sens. Diam.	2.9464	12.7086	0.3511	0.2443	1 770 780 €
	Índice de resiliência	2.9546	6.5980	0.6150	0.4300	1 774 610 €
	Resiliência da rede	2.9546	6.5980	0.6150	0.4300	1 774 610 €

No Quadro 4 apresentam-se os valores da fiabilidade global (rácio de consumos satisfeitos quando uma conduta se encontra fora de serviço) calculados para as soluções obtidas.

Quadro 4 – Comparação das fiabilidades globais das várias soluções obtidas

Conduta	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Custo mínimo		Fiabilidade global = 0.909												Sem a conduta 3 = 0.948										
Fiabilidade	0.995	0.995	0.000	0.245	0.926	0.926	0.979	1.000	1.000	0.999	0.998	0.862	0.998	0.979	0.999	0.997	0.997	0.997	0.997	0.939	0.992	0.992	1.000	1.000
Entropia		Fiabilidade global = 0.947												Sem a conduta 3 = 0.988										
Fiabilidade	0.995	0.996	0.000	0.848	0.998	0.999	0.983	0.999	0.998	1.000	0.984	0.996	0.983	0.980	1.000	1.000	0.997	0.992	0.998	0.999	1.000	0.987	0.987	0.985
Entropia sensível ao diâmetro		Fiabilidade global = 0.909												Sem a conduta 3 = 0.948										
Fiabilidade	0.995	0.995	0.000	0.262	0.987	0.959	0.992	1.000	1.000	1.000	1.000	0.731	1.000	0.979	1.000	0.984	0.963	0.982	0.991	0.998	1.000	1.000	0.997	0.999
Índice de resiliência		Fiabilidade global = 0.909												Sem a conduta 3 = 0.949										
Fiabilidade	0.997	0.997	0.000	0.280	0.981	0.973	0.992	1.000	1.000	1.000	1.000	0.717	1.000	0.983	1.000	0.975	0.977	0.993	0.993	0.969	0.996	1.000	1.000	1.000
Resiliência da rede		Fiabilidade global = 0.909												Sem a conduta 3 = 0.949										
Fiabilidade	0.997	0.997	0.000	0.280	0.981	0.973	0.992	1.000	1.000	1.000	1.000	0.717	1.000	0.983	1.000	0.975	0.977	0.993	0.993	0.969	0.996	1.000	1.000	1.000

A análise dos valores da fiabilidade global (rácio de consumos satisfeitos quando uma conduta se encontra fora de serviço) calculados para as soluções obtidas parece conduzir à conclusão de que a maximização de alguns índices (entropia sensível ao diâmetro, índice de resiliência e resiliência da rede) em pouco ou nada contribui para a fiabilidade da rede. Aparentemente, o único índice de fiabilidade cuja maximização contribuiu para a fiabilidade global foi a entropia.

5. CONCLUSÕES

A avaliação da fiabilidade de RDA é um assunto de bastante importância no âmbito do projeto destas infraestruturas. Porém, como a sua correta avaliação é demasiado complexa, é comum recorrer a medidas indiretas (índices de fiabilidade) para o fazer de forma expedita. No entanto, como estes índices são empíricos e nem sempre tomam em conta os aspetos que, efetivamente, condicionam a fiabilidade de RDA, há que ter alguma prudência na sua utilização. Neste trabalho foram avaliados quatro índices de fiabilidade (entropia, entropia sensível ao diâmetro, índice de resiliência e resiliência da rede) para um estudo de caso (rede hipotética) e conclui-se que, aparentemente, nem todos apontam no mesmo sentido, isto é, a maximização de um dos índices não implica necessariamente a melhoria dos restantes. Por exemplo, a análise dos valores da fiabilidade global (rácio de consumos satisfeitos quando uma conduta se encontra fora de serviço) calculados para as soluções obtidas parece conduzir à conclusão de que a maximização de alguns índices (entropia sensível ao diâmetro, índice de resiliência e resiliência da rede) em pouco ou nada contribui para a fiabilidade da rede. Aparentemente, o único índice de fiabilidade cuja maximização contribuiu para a fiabilidade global foi a entropia. Mas é óbvio que uma conclusão destas não pode ser retirada de um único exemplo, pelo que será necessário repetir este teste numa amostra mais alargada e, aí sim, poder-se-ão tirar conclusões mais fundamentadas. Contudo, parece evidente que esta questão das medidas indiretas da fiabilidade de RDA continua a ser um assunto em aberto que carece de estudos mais aprofundados. Atualmente os autores desta comunicação estão a desenvolver trabalhos nesta área no sentido de, brevemente, reunirem condições para proporem um novo índice de fiabilidade que seja fácil de avaliar e que procure evitar os inconvenientes conhecidos dos que aqui se apresentaram.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) atribuído ao MARE, através do projeto estratégico com a referência UID/MAR/04292/2013.

BIBLIOGRAFIA

ALPEROVITS, E.; SHAMIR, U. – “Design of optimal water distribution systems”, *Water Resources Research*, 13, 6, 1977, pp. 885-900.

AWUMAH, K.; GOULTER, I.; BHATT, S. K. – “Entropy-based redundancy measures in water-distribution networks”, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 117, 5, 1991, pp. 595-614.

CUNHA M.C.; RIBEIRO, L. – “Tabu Search algorithms for water network optimization”, *European Journal of Operational Research*, 157, 3, 2004, pp. 746-758.

CUNHA, M.C.; SOUSA, J.J.O. – “Water distribution network design optimization: Simulated Annealing approach.” *Journal of water Resources Planning and Management, ASCE*, 125, 4, 1999, pp. 215-221.

FUJIWARA, O.; KHANG, D.B. – “A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks”, *Water Resources Research*, 26, 4, 1990, pp. 539-549.

- KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. – “Optimization by simulated annealing”, *Science* 220(4598), 1983, 671-680.
- LIANG, T. – “Design of conduit system by Dynamic Programming”, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 97, 3, 1971, pp. 383-393.
- LIU, H.; SAVIC, D.A.; KAPELAN, Z.; ZHAO, M.; YUAN, Y.; ZHAO, H. – “A diameter-sensitive flow entropy method for reliability consideration in water distribution system design”, *Water Resources Research*, 50, 7, 2014, pp. 5597 - 5610.
- MAIER, H.R.; SIMPSON, A.R.; Zecchin, A.C.; FOONG, W.K.; PHANG, K.Y.; SEAH, H.Y.; TAN, C.L. – “Ant colony optimization for design of water distribution systems”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 129, 3, 2003, pp. 200-209.
- MURANHO, J.; FERREIRA, A.; SOUSA, J.; GOMES, A.; SÁ MARQUES, A. – “WaterNetGen – an EPANET extension for automatic water distribution network models generation and pipe sizing”, *Water Science & Technology: Water Supply*, IWA Publishing, 12(1), doi: 10.2166/ws.2011.121, 2012, 117-123.
- MURANHO, J.; FERREIRA, A.; SOUSA, J.; GOMES, A.; SÁ MARQUES, A. – *WaterNetGen*, <http://www.dec.uc.pt/~WaterNetGen/>, 2016.
- PRASAD, T.D.; PARK, N.S. – “Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130, 1, 2004, pp. 73 - 82.
- SAVIC, D.A.; WALTERS, G.A. – “Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 123, 2, 1997, pp. 67-77.
- SOUSA, J. – *Métodos de Apoio À Decisão Para O Dimensionamento E a Operação de Sistemas de Abastecimento de Água*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil na especialidade de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Coimbra, Universidade de Coimbra, 2006.
- TANYIMBOH, T.T.; TEMPLEMAN, A.B. – “Calculating maximum entropy flows in networks”, *Journal of Operational Research Society*, 44, 4, 1993, pp. 383-396.
- TODINI, E. – “Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach”, *Urban Water*, 2, 3, 2000, pp. 115 - 122.
- WALTERS, G.A. - Discussão de “Maximum entropy flows in single source networks” de T.T. Tanyimboh, e A.B. Templeman, *Engineering Optimization*, 25, 1995, pp. 155-163.