

# TV WPN – PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO PARA ANÁLISE DA VULNERABILIDADE DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

## **João VARAJÃO**

Informático de Gestão, Professor Auxiliar, Centro Algoritmi, UTAD, Vila Real, Portugal  
joao@varajao.com

## **Tiago RODRIGUES**

Estudante de Mestrado em Engenharia Civil, UTAD, Vila Real, Portugal  
tiago.as.rodrigues83@gmail.com

## **António DUARTE**

Engenheiro Civil, Professor Auxiliar, DEC-UM, Guimarães, Portugal  
aduarte@civil.uminho.pt

## **Humberto VARUM**

Engenheiro Civil, Professor Associado com Agregação, UA, Aveiro, Portugal  
hvarum@ua.pt

## **Jorge PINTO**

Engenheiro Civil, Professor Auxiliar, UTAD, Vila Real e I3N, Aveiro, Portugal  
tiago@utad.pt

## **Isabel BENTES**

Engenheira Civil, Professora Associada, UTAD, Vila Real, Portugal  
ibentes@utad.pt

# 04



## RESUMO

A aplicação da teoria da vulnerabilidade a redes de abastecimento de água reais é um procedimento complexo e moroso, tornando imperativo o desenvolvimento de ferramentas informáticas que agilizem e automatizem esse processo. O programa de cálculo automático que está a ser desenvolvido, designado por TV WPN (Theory of Vulnerability of Water Pipe Networks), constitui um importante estímulo à inclusão do estudo da vulnerabilidade e da avaliação do risco na conceção, dimensionamento e reabilitação de sistemas de abastecimento de água.

Até à data, a aplicação desta teoria restringia-se apenas a exemplos de teste correspondentes a redes fictícias de abastecimento de água, com geometria simples e um limitado número de troços. Com esta nova ferramenta, tais limitações podem ser ultrapassadas, pois o tempo de computação torna-se significativamente mais rápido, mesmo considerando redes reais complexas. Deste modo, o aprofundamento e validação dos fundamentos desta teoria podem ganhar um forte e decisivo impulso, permitindo explorar o seu promissor potencial de aplicação às redes hidráulicas em geral, assumindo-se o novo paradigma da gestão do risco em sistemas urbanos de águas.

**Palavras-chave:** redes de abastecimento de água; vulnerabilidade; avaliação do risco; robustez; cenários de dano.

## ■ 1. INTRODUÇÃO

A teoria da vulnerabilidade de redes de abastecimento de água (TVRAA) é uma teoria emergente, ainda em desenvolvimento, que tem como principal objetivo identificar as partes mais vulneráveis de uma rede de abastecimento de água (RAA). Esta informação poderá ser extremamente útil, quer na fase de projeto, quer na fase de gestão e de exploração deste tipo de sistemas, porque permitirá obter soluções de projeto mais robustas e auxiliar no processo de mitigação de potenciais falhas nos sistemas de abastecimento de água às populações. Sendo unanimemente aceite que uma água segura para consumo humano é um bem precioso, todos os esforços que contribuam para a sua preservação são extremamente relevantes, em termos de saúde pública. A aplicação da TVRAA na fase de projeto ajudará o projetista a decidir acerca da necessidade de reforço ou de redimensionamento das zonas da rede estruturalmente ou hidraulicamente mais sensíveis. Por sua vez, a aplicação da TVRAA nas fases de gestão e de exploração de uma RAA será um importante instrumento de suporte à decisão na elaboração de planos de manutenção e de reabilitação, e na definição das prioridades de intervenção, ao permitir uma seleção criteriosa dos elementos da rede mais importantes, baseada nas consequências produzidas por um ou mais cenários de dano.

Neste contexto, uma RAA é vulnerável quando permitir situações em que um pequeno esforço resulte num dano desproporcional do sistema. A vulnerabilidade de uma RAA está associada à sua qualidade de forma, em que a interligação entre troços é muito valorizada. Esta teoria poderá permitir identificar cenários de dano que, apesar de poderem ser pouco prováveis de ocorrer, poderão resultar em danos funcionais da rede desproporcionais e inadmissíveis. Paralelamente, também permitirá quantificar a consequência em termos de funcionamento de uma RAA associada a um determinado dano e, desta forma, facilitar a determinação do risco associado a cenários de dano. Estas mais-valias identificadas anteriormente justificam que a TVRAA possa ser um importante complemento às teorias clássicas de dimensionamento de RAA.

No contexto desta teoria, face à sua especificidade em termos de abordagem, a ação que induz dano numa RAA poderá ser de diferentes tipos, tais como: excesso de pressão hidráulica,

erro de projeto, erro de construção, sabotagem e outros.

Nesta fase, o dano é considerado como sendo uma perda parcial ou total de uma rede, correspondente a um ou mais trechos. Um cenário de dano corresponde a uma sequência ordenada de eventos de danos.

A aplicação da TVRAA a um dado sistema de abastecimento de água permite identificar cinco tipos distintos de cenários de dano vulneráveis, dos quais se destacam o cenário de colapso total e o cenário de dano de máxima vulnerabilidade. O cenário de colapso total corresponde àquele que requer menor esforço para que a rede fique totalmente inoperacional (i.e., incapacitada de abastecer água com qualidade em qualquer ponto). Por sua vez, o cenário de máxima vulnerabilidade é aquele que apresenta a maior desproporção entre o esforço para haver um determinado dano e a consequente respetiva perda de RAA. Em RAA simples estes cenários vulneráveis poderão ser óbvios de identificar. Contudo, em RAA reais complexas (emalhadas ou mistas, com mais do que um reservatório de abastecimento e/ou com um elevado número de troços), inseridas em aglomerados urbanos de elevada densidade, esta identificação torna-se mais difícil e requer uma metodologia de análise adequada à sistematização do processo.

Atendendo a que a identificação e a quantificação analítica da vulnerabilidade de RAA através da aplicação da TVRAA podem ser um processo moroso e de difícil execução, o desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo automático capaz de processar eficazmente a aplicação desta teoria revelou-se prioritário e imprescindível. Deste modo, está a ser desenvolvido um programa de cálculo automático, designado por TV WPN, para aplicação da TVRAA a RAA. Este programa, para além de identificar e de quantificar a vulnerabilidade de RAA, funcionará como uma importante alavanca do desenvolvimento da própria TVRAA, uma vez que, de forma rápida, permitirá a experimentação e a análise generalizada de um elevado número de casos de estudo, com base nesta teoria de avaliação do risco.

Neste artigo, além duma retrospectiva da TVRAA, onde se definem os seus conceitos base, apresenta-se uma breve descrição do programa TV WPN e um exemplo demonstrativo (simples) da sua utilização.

A aplicação da TVRAA é um importante complemento das teorias clássicas de dimensionamento de RAA ajudando a decidir acerca da necessidade de reforço ou de redimensionamento das zonas da rede mais sensíveis, na elaboração de planos de manutenção e reabilitação e na definição de prioridades de intervenção.

## ■ 2. RETROSPECTIVA SOBRE A TEORIA DA VULNERABILIDADE DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA (TVRAA)

O desenvolvimento da TVRAA até à identificação dos cenários de dano é feito em três etapas, à semelhança da aplicação da teoria da vulnerabilidade estrutural (Pinto *et al.*, 2002). A primeira etapa consiste no processo de aglutinação, a segunda etapa é a representação da RAA ou da sub-RAA através de um modelo hierárquico e a última etapa refere-se ao processo de desaglutinação desse modelo hierárquico (Pinto *et al.*, 2010a e 2010c).

Os fundamentos teóricos de base da TVRAA (Pinto *et al.*, 2010a) incluem como principais conceitos os de sub-RAA primitiva (WPN primitive cluster), sub-RAA (WPN branch cluster), sub-RAA de referência (WPN reference cluster), anel de RAA (WPN ring), dano de RAA (WPN deteriorating event), qualidade de forma (well formedness), conexão de nodal (nodal connectivity), capacidade resistente ao dano (damage demand,  $E$ ), perda de rede (separateness,  $\gamma$ ) e índice de vulnerabilidade (vulnerability index,  $\phi$ ) (Pinto *et al.*, 2010b).

Face à relevante especificidade do conceito de qualidade de forma de uma RAA na TVRAA, é importante frisar que esta grandeza está relacionada com a rigidez estrutural dos tubos que constituem o sistema hidráulico, com o tipo de uniões que materializam a ligação desses tubos, com a orientação relativa entre esses tubos e com a quantidade de ligações existentes. Nesta fase, a qualidade de forma de uma RAA está a ser avaliada através da sua perda de carga total, dado que esta grandeza hidráulica incorpora, de forma direta ou indireta, o efeito daqueles aspetos técnicos e construtivos. Deste modo, considera-se que quanto menor for a perda de carga total de uma RAA melhor será a sua qualidade de forma. Paralelamente, também se deve destacar o conceito de conexão nodal que, por definição, consiste num indicador da interligação de uma sub-RAA à restante RAA. Quanto maior for a conexão nodal, maior será o número de caminhos alternativos de abastecimento de água (Bentes *et al.*, 2011).

Durante o processo de aplicação da TVRAA, e como resultado do processo de aglutinação, uma RAA é hierarquizada em termos de qualidade de forma. Nessa hierarquia, as partes da RAA que apresentam melhor qualidade de forma são as primeiras a serem aglutinadas de modo a formar uma sub-RAA. Por sua vez, as partes da RAA que apresentam pior forma são as últimas a serem aglutinadas. A visualização gráfica deste processo de aglutinação é conseguida através

da obtenção do modelo hierárquico que, de forma análoga ao modelo de pirâmide, contempla, na base, as sub-RAA com melhor qualidade de forma e prevê uma degradação desta qualidade no sentido ascendente. No topo deste modelo aparece o reservatório ou reservatórios (i.e., sub-RAA de referência) que, nesta fase e por simplificação, ainda são considerados sub-RAA isentas de sofrer dano. A filosofia subjacente a este tipo de modelo hierárquico radica na sua analogia com modelos biológicos similares (Pinto *et al.*, 2010b). O interesse em considerar as partes com pior qualidade de forma de uma RAA no topo da hierarquia advém do facto de, no processo de desaglutinação, permitir encontrar cenários de dano vulneráveis de forma mais eficiente. Atendendo a que este processo decorre no sentido descendente deste modelo, as primeiras sub-RAA a serem analisadas em termos de dano são as referentes aos constituintes da RAA que apresentam pior qualidade de forma e onde será mais previsível detetar cenários de dano mais vulneráveis. Tendo em conta que um cenário de dano vulnerável detetado no processo de desaglutinação pode corresponder a uma sequência de uma série de eventos de dano na RAA e que a ocorrência de um evento de dano isolado (e.g., obstrução de um tubo) pode ter implicações hidráulicas em toda a RAA (e.g., reajustamento de caudais), é necessário realizar um novo processo de aglutinação intercalar sempre que se identifique um evento de dano através do processo de aglutinação.

Face ao exposto e sendo perceptível que a aplicação analítica da TVRAA a RAA reais mais complexas requer um tempo de cálculo muito longo, o desenvolvimento duma aplicação de software, para suporte a uma aplicação expedita da TVRAA, revelou-se fundamental. Esse importante esforço de elaboração de uma ferramenta de cálculo automático foi iniciado tendo dado origem ao programa de cálculo automático designado por VRHAA (Pinto *et al.*, 2010c), desenvolvido em linguagem C (GCC, versão 4.2, 2000). Contudo, face às limitações sentidas na utilização desta ferramenta informática, concluiu-se ser conveniente desenvolver um novo programa de cálculo automático, agora designado por TV WPN.

Como nota final, é importante realçar a mais-valia que a TVRAA poderá originar quer na avaliação (Duarte *et al.*, 2010) quer no mapeamento do risco (Pinto *et al.*, 2011) associado ao funcionamento deste tipo de sistemas hidráulicos.

### ■ 3. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA TV WPN

Tal como foi sublinhado anteriormente, a complexidade da aplicação analítica da TVRAA a RAA reais torna indispensável o recurso a ferramentas de cálculo automático como o programa TV WPN. Esta ferramenta consiste numa aplicação Web, atualmente na versão 1.9 Beta (em desenvolvimento), em inglês, cujo acesso é disponibilizado on-line, gratuitamente (em [www.sciencesphere.org/tvwpn](http://www.sciencesphere.org/tvwpn)). Esta aplicação permite não só identificar e quantificar os cenários de dano vulneráveis de uma RAA, mas também acompanhar todo o processo

de cálculo inerente à aplicação prática da TVRAA. Para o desenvolvimento da aplicação TV WPN foram usadas as linguagens PHP, HTML, Javascript e CSS, sendo o ambiente de execução um servidor Web Apache em sistema operativo Linux. Dado ser uma aplicação Web, pode ser utilizada recorrendo a qualquer browser Internet de última geração. O programa de cálculo automático está estruturado de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 1 (Pinto *et al.*, 2010c).

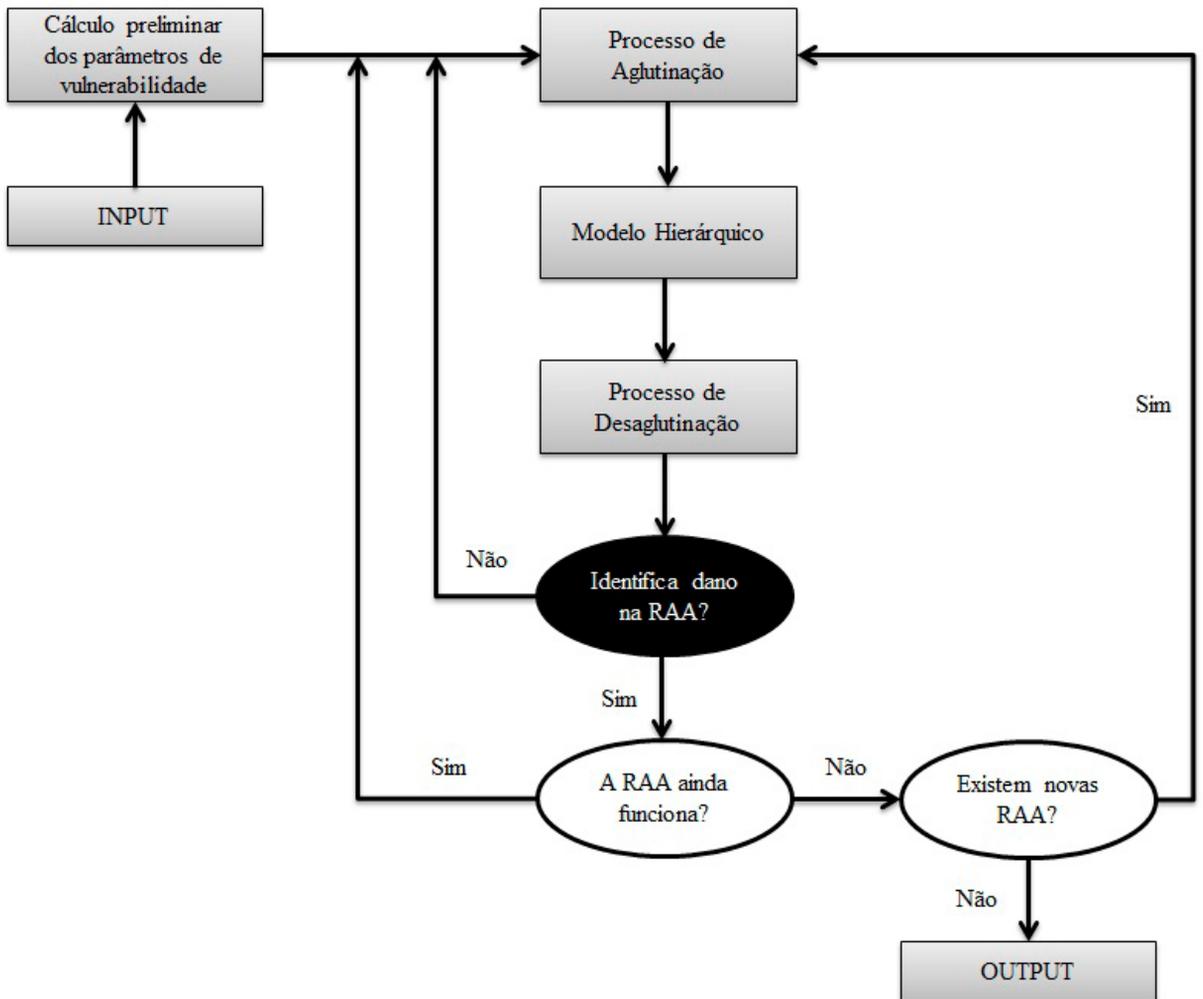
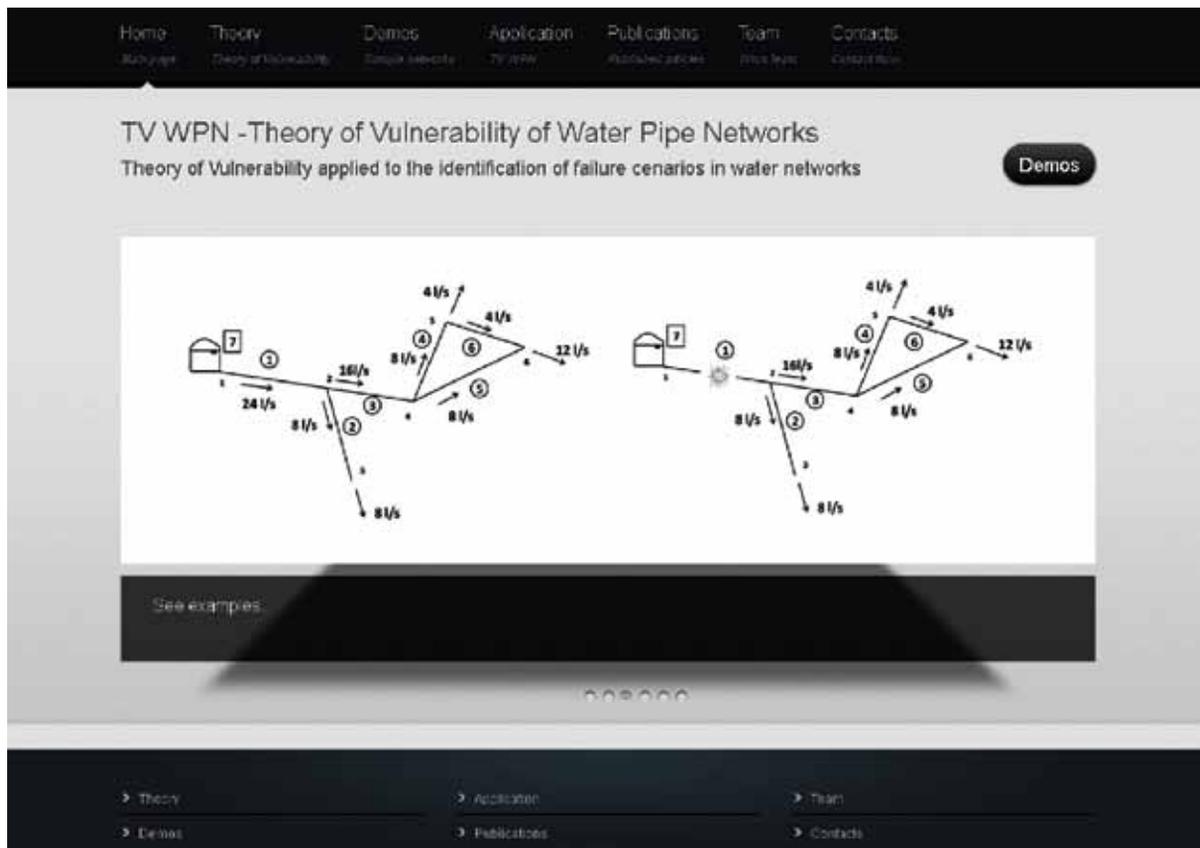


FIGURA 1 | Fluxograma do programa TV WPN.

Na Figura 2 apresenta-se a página Web de entrada da aplicação, que contém um menu com diversas opções, possibilitando, entre outras funcionalidades, o acesso a informação

sobre a TVRAA, a exemplos de RAA pré-definidos e ao programa de cálculo propriamente dito.



**FIGURA 2** | Página de entrada da aplicação TV WPN.

O programa TV WPN permite ler de RAA definidas em XML (a estrutura a respeitar pode ser consultada através da opção "XML sample file") e selecionar os detalhes das etapas de cálculo que se pretendem visualizar como, por exemplo, o processo de aglutinação ou a construção do modelo hierárquico. O processo de cálculo é iniciado quando é selecionada a opção "Load file". Como resultado final é apresentada uma tabela, identificando os cenários de dano vulneráveis detetados, os parâmetros de vulnerabilidade referentes a cada um

desses cenários e, adicionalmente, são identificados os cenários de máxima vulnerabilidade e de colapso total. Para próximas versões do TV WPN está prevista a implementação da representação gráfica de diversos elementos do processo de cálculo, como a definição da RAA ou o faseamento de cálculo do processo de desaglutinação. Uma descrição mais detalhada sobre o modo de utilização do programa TV WPN é disponibilizada na secção seguinte deste artigo, onde é contemplado um exemplo de aplicação.

## ■ 4. EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DO TV WPN

De forma a exemplificar a utilização do programa TV WPN, estudou-se em termos de vulnerabilidade a RAA apresentada na Figura 3. Esta RAA é constituída por quatro troços (troços de 1 a 4), por quatro nós (nós de 1 a 4) e por um reservatório. Toda a RAA é formada por tubos

de policloreto de vinil (PVC) com um valor de rugosidade absoluta equivalente de 0,01 mm. A pressão de serviço adotada para o dimensionamento hidráulico da referida RAA foi de 600 MPa. O valor da viscosidade cinemática da água foi considerado igual a  $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

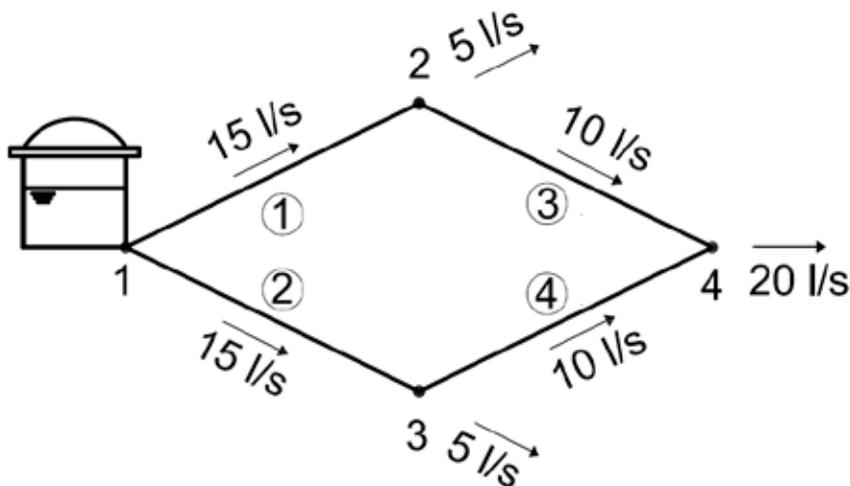


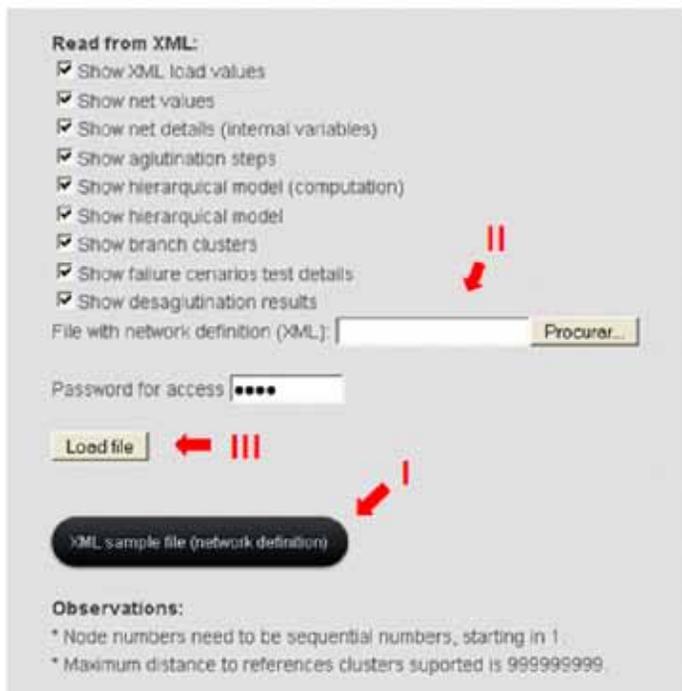
FIGURA 3 | Figura 3: RAA usada como exemplo.

Tal como foi referido anteriormente, os dados da RAA têm de ser introduzidos na aplicação TV WPN através de um ficheiro de formato “.xml”. Para isso, está disponível no ambiente de trabalho um ficheiro com um exemplo de definição de uma RAA acessível através da seleção de “XML sample file (network definition)”, detalhe I da Figura 4a. O utilizador terá que adequar esse ficheiro ao seu caso de estudo de RAA. Neste caso, a Figura 4b ilustra esse procedimento respeitante à introdução dos dados do troço 1 da RAA usada como exemplo tais como os nós (i.e. <NET\_NODE\_BEGIN> e <NET\_NODE\_END>), o comprimento (i.e., <NET\_LENGTH>), o caudal (i.e., <NET\_Q>), os diâmetros comercial e interior (i.e. <NET\_DCOM> e <NET\_DINT>), a rugosidade absoluta equivalente (i.e., <NET\_K>), a pressão de serviço (i.e., <NET\_p>) e a viscosidade cinemática da água (i.e., <NET\_D>). Este procedimento necessita de ser realizado para todas as sub-RAA primitivas (i.e. restantes troços da RAA incluindo o reservatório). No respeitante ao reservatório (i.e., sub-RAA de referência) os dados são todos zero excluindo os referentes aos <NET\_NODE\_BEGIN> e <NET\_NODE\_END>, que são iguais entre si e

correspondentes ao nó de ligação da RAA ao reservatório. Neste exemplo, este nó corresponde ao nó 1.

Após este procedimento, a introdução de dados termina quando se procede ao referente ao detalhe II da Figura 4.a. O processo de cálculo da aplicação TVWPN é iniciado quando o utilizador seleciona “Load file” do ficheiro “.xml” criado especificamente para a RAA em estudo (detalhe III da Figura 4.a). O tempo de processamento pode variar de alguns segundos a vários minutos, dependendo da complexidade da RAA em análise. Alguns dos resultados obtidos, através da aplicação do TV WPN ao exemplo da RAA representada na Figura 3, estão apresentados nas Tabelas 1 a 5 e na Figura 5. As características geométricas e hidráulicas da RAA em estudo aparecem na Tabela 1. Esta informação é útil na medida em que serve de validação à introdução de dados. Os dados numéricos referentes ao processo de aglutinação também são apresentados detalhadamente em forma de tabela tal como o exemplificado na Tabela 2 para o primeiro passo do processo de aglutinação da RAA da Figura 3.

Os candidatos de sub-RAA que podem ser



a) Menu principal do programa TV WPN

```

<SHAPE>
<LINK>
<NET_SUBRAA>1</NET_SUBRAA>
<NET_NODE_BEGIN>1</NET_NODE_BEGIN>
<NET_NODE_END>2</NET_NODE_END>
<NET_LENGTH>200</NET_LENGTH>
<NET_Q>15</NET_Q>
<NET_DCOM>160</NET_DCOM>
<NET_DINT>150.6</NET_DINT>
<NET_K>0.01</NET_K>
<NET_P>6</NET_P>
<NET_D>1.01E-6</NET_D>
</LINK>
<LINK>
<NET_SUBRAA>2</NET_SUBRAA>
<NET_NODE_BEGIN>1</NET_NODE_BEGIN>
<NET_NODE_END>3</NET_NODE_END>
<NET_LENGTH>200</NET_LENGTH>
<NET_Q>15</NET_Q>
<NET_DCOM>160</NET_DCOM>
<NET_DINT>150.6</NET_DINT>
<NET_K>0.01</NET_K>
<NET_P>6</NET_P>
<NET_D>1.01E-6</NET_D>
</LINK>

```

b) Código XML exemplo

FIGURA 4 | Programa TV WPN e código XML.

TABELA 1 | Características geométricas e hidráulicas da RAA usada como exemplo.

Leaf cluster	Begin node	End node	Length (m)	Flow (l/s)	Commercial diameter (mm)	Internal diameter (mm)	Roughness	Operating pressure (Kgf/cm <sup>2</sup> )
1	1	2	200	15	160	150.6	0.01	6
2	1	3	200	15	160	150.6	0.01	6
3	2	4	200	10	125	117.6	0.01	6
4	3	4	200	10	125	117.6	0.01	6

aglutinados entre si (Candidate ID) e os respectivos parâmetros de vulnerabilidade de perda de carga (Head loss), de capacidade resistente ao dano (Damage demand), de conexão nodal (Nodal connectivity) e de distância ao reservatório (Distance from storage tank) estão devidamente discriminados. No caso específico da RAA da Figura 3, e aplicando-se os critérios de seleção do processo de aglutinação da TVRAA verifica-se (Tabela 2) que o primeiro candidato a formar uma nova sub-RAA (New branch cluster) resulta da aglutinação dos

troços 1 e 2, porque é o que apresenta menor valor de perda de carga (Head loss).

No caso concreto desta RAA (Figura 3), foram necessários quatro passos para que a RAA fosse totalmente aglutinada (i.e., representada por uma única sub-RAA), sub-RAA 12 da Tabela 3 e da Figura 5. Relembra-se que a formulação do modelo hierárquico de uma RAA assenta nos resultados obtidos através do processo de aglutinação (Pinto *et al.*, 2010a). A formulação numérica deste modelo para a RAA em estudo está apresentada na Tabela 3 e a

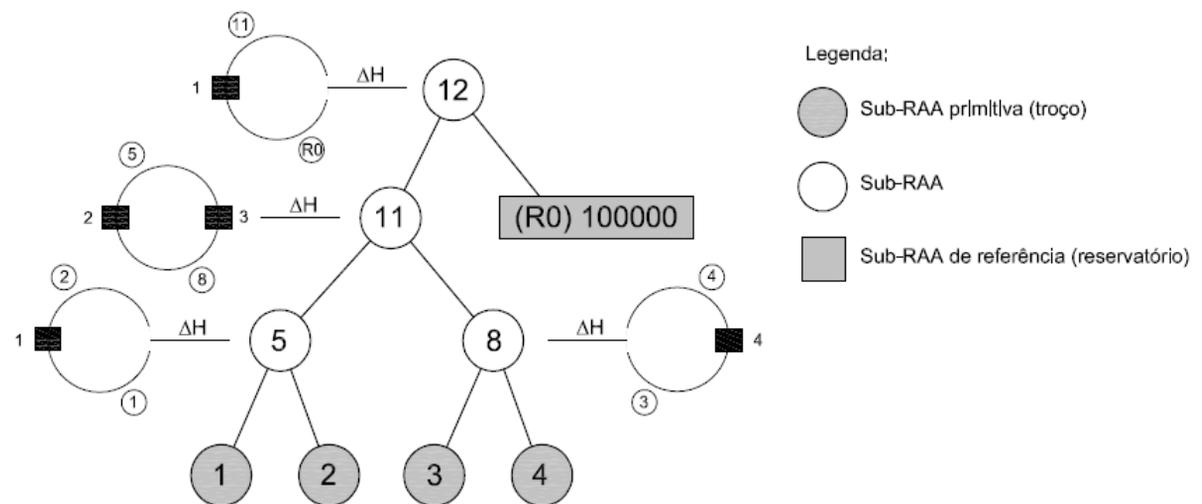
**TABELA 2** | Primeiro passo do processo de aglutinação da RAA (exemplo).

Candidate ID	Leaf cluster candidate (1)	Leaf cluster candidate (2)	Head loss (m)	Damage Demand (Kg/cm <sup>2</sup> )	Nodal connectivity	Distance from storage tank (m)	New branch cluster	Step
5	1	2	1.68	12	2	0	*	0
6	1	3	2.17	12	2	0	-	0
7	2	4	2.17	12	2	0	-	0
8	3	4	2.67	12	2	200	-	0

**TABELA 3** | Formulação numérica do modelo hierárquico.

Net hierarchical model (show path)

Link: 12  
 Link: 11 (top: 12)  
 Link: 5 (top: 11)  
 Link: 1 (top: 5)  
 Link: 2 (top: 5)  
 Link: 8 (top: 11)  
 Link: 3 (top: 8)  
 Link: 4 (top: 8)  
 Link: 100000 (top: 12)


**FIGURA 5** | Modelo hierárquico da RAA intacta (exemplo).

representação gráfica desse modelo está ilustrada na Figura 5.

Através da desaglutinação faseada do modelo hierárquico (i.e. focada em cada sub-RAA) é então possível identificar diferentes cenários de dano vulneráveis e os seus respectivos parâmetros de vulnerabilidade ( $ER$ ,  $\gamma_r$  e  $\phi$ ). A Tabela 4 exemplifica esta etapa de aplicação da TVRAA à sub-RAA 11 da RAA usada como exemplo.

Finalmente, a aplicação TV WPN termina com a apresentação dos diferentes cenários de dano vulnerável identificados e com a indicação do cenário de máxima vulnerabilidade e de colapso

total. Neste caso específico, estes cenários são coincidentes e relativos ao cenário de dano caracterizado por haver dano no troço 2 seguido por haver dano no troço 1 (Tabela 5). Face à simetria geométrica e hidráulica desta RAA, o cenário de dano caracterizado por haver dano no troço 1, seguido por haver dano no troço 2, apresentará a mesma vulnerabilidade hidráulica que a do cenário anterior.

**TABELA 4** | Cenário de dano vulnerável identificado através da desaglutinação da sub-RAA 11.

1 - branch cluster / failure cenário)

**Failure cenário: 11**

- > Net definition
- > Aglutination process
- > Net hierarchical model (computation)
- > Net hierarchical model (show path)
- > Branch clusters (failure cenários)

$ER=0.5$   
 $\gamma_r=1$   
 $\phi=2$   
 Blow sequence: 2->1

**TABELA 5** | Identificação dos tipos de cenário de dano vulnerável.

Failure cenários:					
No.	Cenário	$\phi$	$ER$	$\gamma_r$	Comments
1	2->1	2	0.5	1	Total collapse cenário. Maximum vulnerability.

bom ambiente acima de tudo



### SISTEMAS ENTERRADOS PARA RECOLHA DE RESÍDUOS

- o Fácil de instalar
- o Fácil de usar
- o Fácil de Recolher
- o Mínima manutenção
- o Integração e Valorização da paisagem urbana

**sotkon**  
waste systems

[www.sotkon.com](http://www.sotkon.com)

## ■ CONSIDERAÇÕES FINAIS

A TVRAA tem vindo a ser progressivamente desenvolvida evidenciando o seu potencial de contribuição para a obtenção de RAA mais robustas. A experiência adquirida na progressiva aplicação desta teoria revelou uma necessidade imperiosa de se dispor de uma ferramenta de cálculo automático capaz de efetuar uma análise célere e sistemática da vulnerabilidade de RAA. O trabalho de investigação aqui descrito visou precisamente o desenvolvimento e apresentação de uma ferramenta informática desse tipo, designada por TV WPN, que consiste numa aplicação Web, cuja versão atual é 1.9 Beta, disponibilizada on-line e gratuitamente pela equipa de investigação (em [www.sciencesphere.org/tvwpn](http://www.sciencesphere.org/tvwpn)). É de realçar que a referida ferramenta se encontra em fase de testes. De modo a demonstrar a utilização do programa TV WPN foi usada uma RAA simples como exemplo. O tempo requerido para o processamento do cálculo automático, recorrendo ao programa TV WPN, é residual face ao tempo que seria necessário para o processar manualmente, onde a probabilidade de se cometerem erros de análise e de cálculo são incomensuravelmente superiores. Através dos testes realizados até ao momento, é já possível concluir que o programa TV WPN permite ultrapassar as limitações de cálculo e de tempo presentes no processo manual, constituindo assim um precioso e inovador contributo para se aprofundar os fundamentos da TVRAA como instrumento de suporte à decisão na conceção, projeto e reabilitação de redes de abastecimento de água, e de promoção dum novo paradigma de gestão do risco em sistemas urbanos de águas.

## ■ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bentes, I.; Afonso, L.; Varum, H.; Pinto, J.; Varajão, J.; Duarte, A.; Agarwal, J. (2011). A New Tool to Assess Water Pipe Networks Vulnerability and Robustness. *Engineering Failure Analysis*, 18, 1637-1644. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2011.01.002
- Duarte, A.A.L.S.; Pinto, J.; Afonso, L.; Bentes, I.; Varum, H.; Varajão, J. (2010). Proposal of a methodology to evaluate the risk of a vulnerable failure scenario of a water pipe network system. *Proceedings of the Seven International Conference on Computer Simulation in Risk Analysis and Hazard Mitigation & Fifth International Conference on Prevention, Assessment, Rehabilitation and Development of Brownfield Sites*. Algarve, Portugal, September, 13-15. Risk analysis VII & Brownfields V, edited by C.A. Brebbia. WIT Press (ISBN: 978-1-84564-472-7), and *Transactions on Information Technologies* (ISSN 1746-4463), WIT eLibrary, 43, 515-526. DOI:10.2495/RISK100431.
- Pinto, J.; Varum, H.; Duarte, A.; Afonso, L.; Varajão, J.; Bentes, I. (2011). Risco de cenários de dano vulneráveis de redes de abastecimento de água. Ed. RISCOS – Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, *Territorium*, 18, 271-278.
- Pinto, J.; Varum, H.; Bentes, I.; Agarwal, J. (2010a). A Theory of Vulnerability of Water Pipe Network (TVWPN). *Water Resources Management*, 24, 4237-4254. DOI: 10.1007/s11269-010-9655-3.
- Pinto, J.; Afonso, L.; Varajão, J.; Bentes, I.; Varum, H.; Duarte, A.A.L.S.; Agarwal, J. (2010b). Contribution for the Vulnerability Assessment of Water Pipe Network Systems. *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics* (ISSN: 1790-5087), 5 (3), 236-245. (<http://www.worldses.org/journals/fluid/fluid-2010.htm>).
- Pinto, J.; Varajão, J.; Varum, H.; Duarte, A.; Bentes, I. (2010c). Sistemas de abastecimento de água – Avaliação da vulnerabilidade. *Recursos Hídricos*, ed. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 31 (2), 61-71.
- Pinto, J.T.; Blockley, D.I.; N.J. Woodman, N.J. (2002). The risk of vulnerable failure. *Structural Safety*, 24, 107-122.