

UNIVERSIDADE DE ÉVORA



**APLICAÇÃO DO MODELO DE HIERARQUIA FUZZY NO
APOIO À DECISÃO DE REABILITAÇÃO EM SISTEMAS
DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Paulo Alexandre Barroso Faria
(Licenciado em Engenharia dos Recursos Hídricos)

Dissertação para a obtenção de Grau de Mestre em Engenharia dos Recursos
Hídricos

Orientadora Científica
Prof.^a Maria Madalena Moreira

Évora, Outubro de 2010

UNIVERSIDADE DE ÉVORA



**APLICAÇÃO DO MODELO DE HIERARQUIA FUZZY NO APOIO À DECISÃO DE
REABILITAÇÃO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Mestrado em Engenharia dos Recursos Hídricos
(especialidade em Planeamento e Gestão da Água)

Paulo Alexandre Barroso Faria

Orientadora Científica: Prof.^a Maria Madalena Moreira

RESUMO

Os sistemas de abastecimento de água são infra-estruturas de importância crucial nas sociedades actuais. No entanto, estas infra-estruturas estão expostas constantemente a perigos/ameaças que podem pôr em causa o seu funcionamento adequado. A vulnerabilidade dos sistemas de abastecimento de água a estas acções reflecte o risco que deve ser cuidadosamente avaliado e permanentemente monitorizado.

No presente estudo, aplica-se uma metodologia que permite identificar e hierarquizar as componentes de uma rede de distribuição que necessitam de reabilitação, de modo a manter o desempenho do sistema de abastecimento de água dentro de níveis aceitáveis. Esta metodologia é composta pela avaliação do desempenho do sistema, caracterização do risco, avaliação da vulnerabilidade e pela aplicação do Modelo de Hierarquia Fuzzy.

A metodologia é aplicada à rede de distribuição do sistema de abastecimento de água de um pequeno aglomerado (Corte da Velha) localizado no Alentejo.

Palavras-chave: sistemas de abastecimento de água, avaliação da vulnerabilidade, caracterização do risco, Modelo de Hierarquia Fuzzy, reabilitação.

APPLICATION OF FUZZY HIERARCHY MODEL – A DECISION SUPPORT FOR WATER SYSTEM'S REHABILITATION

ABSTRACT

Water supply systems are, doubtless, infrastructures of main importance in today's societies. However, these infrastructures are constantly being exposed to dangers and/or threats that can compromise its proper functioning. The water supply system's vulnerability reflects the risk that must be carefully evaluated and continuously monitored.

The present study applies a methodology that allows identifying and prioritizing the distribution network's components that will require rehabilitation, in order to maintain the performance of the water supply system within acceptable levels.

The application of the above mentioned methodology consists on the evaluation of the system performance, risk characterization, vulnerability assessment and implementation of the Fuzzy Hierarchy Model.

The methodology is applied to the water supply distribution system of a small cluster (Corte da Velha) located in the Alentejo.

Keywords: water supply systems, vulnerability assessment, risk assessment, risk characterization, Fuzzy Hierarchy Model, rehabilitation.

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que, directa ou indirectamente, contribuíram e tornaram possível a execução deste trabalho, expresso os meus agradecimentos, especialmente:

À Prof.^a Maria Madalena Moreira, Professora Auxiliar da Universidade de Évora, orientadora científica desta dissertação, pela sua total disponibilidade e apoio à elaboração deste estudo. Agradeço também pelo reconhecido espírito crítico com que interveio ao longo da execução do presente trabalho, a cedência de material bibliográfico e a partilha de conhecimentos.

À Eng.^a Veruska Zidko pelo apoio prestado, nomeadamente, na cedência da sua dissertação de mestrado que serviu como ponto de partida para este trabalho.

Ao Eng.^o Lucas Carvalho de Vasconcelos pela preciosa ajuda na resolução de problemas na simulação do sistema de abastecimento no software EPANET 2.0.

Aos meus pais, por me proporcionarem esta oportunidade. Obrigado pela confiança e apoio.

Ao meu irmão, cunhada e sobrinha, pelos momentos de descontração e boa disposição que serviram para aliviar o stress.

À Rita Coelho pela constante amizade, apoio, paciência e momentos de descontração. Obrigado pela motivação e força transmitida nos momentos em que faltava.

E a todos aqueles que, embora não referidos, contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho.

ÍNDICE DE TEXTO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA	1
1.2 OBJECTIVOS	2
1.3 METODOLOGIA.....	2
1.4 ESTRUTURA E CONTEÚDO	3
2. SÍNTESE DE CONHECIMENTOS	4
2.1 INTRODUÇÃO	4
2.2 GESTÃO DO RISCO.....	4
2.2.1 <i>O Conceito de Risco</i>	4
2.2.2 <i>Princípios da Gestão do Risco</i>	6
2.2.3 <i>Abordagem de Gestão do Risco</i>	7
2.2.4 <i>Processo de Gestão do Risco</i>	8
2.2.4.1 Comunicação e Consulta	9
2.2.4.2 Estabelecimento do Contexto	9
2.2.4.3 Caracterização do Risco	11
2.2.4.4 Tratamento do Risco	17
2.2.4.5 Monitorização e Revisão	19
2.3 LÓGICA FUZZY	20
2.3.1 <i>Introdução</i>	20
2.3.2 <i>Breve Introdução Histórica</i>	21
2.3.3 <i>Aplicações da Lógica Fuzzy aos Sistemas de Água</i>	22
2.3.4 <i>Conjuntos Fuzzy</i>	23
2.3.4.1 Teoria dos Conjuntos Fuzzy.....	23
2.3.4.2 Variáveis Linguísticas.....	25
2.3.4.3 Funções de Pertinência	26
2.3.4.4 Propriedades	28
2.3.4.5 Relações Fuzzy.....	29
2.3.4.6 Composição de Relações.....	29
2.3.4.7 Proposições Fuzzy	31
2.3.5 <i>Sistema de Inferência Fuzzy</i>	33
3. METODOLOGIA	36
3.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIDRÁULICO DE SISTEMAS EM PRESSÃO	36
3.1.1 <i>Introdução</i>	36
3.1.2 <i>Propriedade ou Variável Hidráulica</i>	37
3.1.3 <i>Curvas de Penalidade</i>	37
3.1.3.1 Considerações Gerais	37
3.1.3.2 Pressão de Serviço.....	38
3.1.3.3 Velocidade de Escoamento	40
3.1.4 <i>Funções de Generalização</i>	42
3.1.4.1 Considerações Gerais	42
3.1.4.2 Pressão de Serviço.....	43
3.1.4.3 Velocidade de Escoamento	43
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO RISCO	45
3.2.1 <i>Identificação do Risco</i>	45
3.2.2 <i>Análise do Risco</i>	45
3.2.3 <i>Avaliação do Risco</i>	49
3.3 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE SISTEMAS EM PRESSÃO	52
3.3.1 <i>Introdução</i>	52
3.3.2 <i>Curvas de Vulnerabilidade</i>	52
3.3.2.1 Considerações Gerais	52
3.3.2.2 Pressão de Serviço.....	53
3.3.2.3 Velocidade de Escoamento	55
3.3.3 <i>Funções de Generalização</i>	56

3.4	APLICAÇÃO DO MODELO DE HIERARQUIA FUZZY A REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA TOMADA DE DECISÃO DE REABILITAÇÃO.....	58
3.4.1	<i>Introdução.....</i>	58
3.4.2	<i>Definição dos Parâmetros e Atributos do Modelo.....</i>	59
3.4.3	<i>Definição das Matrizes.....</i>	61
3.4.3.1	Introdução.....	61
3.4.3.2	Matriz de Procura.....	63
3.4.3.3	Matriz de Oferta.....	64
3.4.3.4	Matriz Produto C.....	65
4.	CASO DE ESTUDO – SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE CORTE DA VELHA	67
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	67
4.2	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	73
4.2.1	<i>Avaliação do Desempenho do Sistema de Abastecimento de Água</i>	<i>73</i>
4.2.2	<i>Caracterização do Risco</i>	<i>82</i>
4.2.2.1	Identificação do Risco	82
4.2.2.2	Análise do Risco.....	82
4.2.2.3	Avaliação do Risco.....	84
4.2.3	<i>Avaliação da Vulnerabilidade do Sistema de Abastecimento de Água ao Aglomerado Corte da Velha.....</i>	<i>86</i>
4.2.4	<i>Aplicação do Modelo de Hierarquia Fuzzy à Rede de Distribuição de Corte da Velha... 92</i>	
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	103
5.1	SÍNTESE DO TRABALHO DESENVOLVIDO	103
5.2	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	104
5.2.1	<i>Avaliação do Desempenho do Sistema Hidráulico em Pressão.....</i>	<i>104</i>
5.2.2	<i>Caracterização do Risco.....</i>	<i>105</i>
5.2.3	<i>Avaliação da Vulnerabilidade do Sistema Hidráulico em Pressão</i>	<i>105</i>
5.2.4	<i>Aplicação do Modelo de Hierarquia Fuzzy.....</i>	<i>106</i>
5.3	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	107
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Dimensões do conceito risco (Almeida, 2005a)	6
Figura 2 - Componentes da abordagem de gestão do risco (Adaptado da ISO/DIS 31000: 2008)	7
Figura 3 - Processo de gestão do risco (Adaptado da ISO/DIS 31000: 2008)	8
Figura 4 - Relação Perigo e Vulnerabilidade vs Dano (Adaptado: Zidko, 2008)	12
Figura 5 - Classificação dos Perigos/Ameaças.....	12
Figura 6 - Variável linguística temperatura (Gomide et al., 1995)	25
Figura 7 - Funções de pertinência para a variável estatura (Tanscheit, 2009)	27
Figura 8 - Sistema de Inferência Fuzzy (Tanscheit, 2009)	34
Figura 9 – Principais etapas da avaliação do desempenho de sistemas de saneamento básico (Adaptado de Coelho et al., 2006)	36
Figura 10 - Curvas de penalidade para (a) a pressão, (b) a pressão mínima, (c) a pressão máxima e (d) a flutuação de pressão (adoptadas de Jacob, 2006).....	39
Figura 11 - Curvas de penalidade para (a) a velocidade, (b) a velocidade mínima e (c) a velocidade máxima (adoptadas de Jacob, 2006).....	42
Figura 12 - Curvas de vulnerabilidade para (a) pressão (global), (b) pressão mínima, (c) pressão máxima e (d) flutuação de pressão (Fonte: Zidko, 2008)	54
Figura 13 - Curvas de vulnerabilidade para (a) velocidade, (b) velocidade mínima e (c) velocidade máxima (Adaptadas de Zidko, 2008).....	56
Figura 14 - Funções de pertinência (Adaptado de Nobre, 2006).....	63
Figura 15 - Localização da aldeia Corte da Velha	67
Figura 16 - Esquema do sistema de abastecimento de água da aldeia de Corte da Velha.....	68
Figura 17 - Topografia do terreno (EPANET 2.0)	68
Figura 18 - Classes de comprimento das condutas (EPANET 2.0).....	69
Figura 19 – Classes de diâmetro das condutas (EPANET 2.0).....	70
Figura 20 - Padrão temporal de consumos (EPANET 2.0).....	71
Figura 21 - Curva característica da bomba (EPANET 2.0).....	71
Figura 22 - Controlos com condições múltiplas para o funcionamento da bomba na estação elevatória (EPANET 2.0).....	72
Figura 23 - Pressão nos nós e velocidade nos troços às 13 horas (EPANET 2.0).	72
Figura 24 - Diagrama de simulação dinâmica do desempenho da pressão.....	76
Figura 25 - Diagrama de simulação dinâmica do desempenho da pressão mínima.....	76
Figura 26 - Diagrama de simulação dinâmica do desempenho da pressão máxima	77
Figura 27 - Diagrama de simulação dinâmica do desempenho da flutuação de pressão	77
Figura 28 - Diagrama de simulação dinâmica do desempenho da velocidade	79
Figura 29 - Diagrama de simulação dinâmica do desempenho da velocidade mínima	80
Figura 30 - Diagrama de simulação dinâmica do desempenho da velocidade máxima.....	80
Figura 31 - Diagrama de simulação dinâmica da vulnerabilidade da pressão	87
Figura 32 - Diagrama de simulação dinâmica para a vulnerabilidade da pressão mínima	87
Figura 33 - Diagrama de simulação dinâmica da vulnerabilidade da pressão máxima.....	88
Figura 34 - Diagrama de simulação dinâmica da vulnerabilidade da flutuação de pressão	88

Figura 35 - Diagrama de simulação dinâmica da vulnerabilidade da velocidade	89
Figura 36 - Diagrama de simulação dinâmica da vulnerabilidade da velocidade mínima	90
Figura 37 - Diagrama de simulação dinâmica da vulnerabilidade da velocidade máxima	90

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Definição de termos relacionados com o conceito de risco (Adaptado de ISO/IEC Guide 73: 2008).....	5
Quadro 2 - Potenciais Consequências/Danos dos perigos de origem natural (Adaptado: Zidko, 2008)	14
Quadro 3 - Potenciais Consequências/Danos dos perigos de origem não natural (Adaptado: Zidko, 2008).....	16
Quadro 4 - Operações com conjuntos fuzzy (Adaptado de Conjuntos Fuzzy e Lógica Fuzzy, 2010)	28
Quadro 5 - Lista de perigos passíveis de ocorrer	45
Quadro 6 - Matriz de Significância dos perigos/ameaças (Acevedo, 2002)	46
Quadro 7 - Classificação da significância do perigo (Acevedo, 2002).....	46
Quadro 8 - Identificação dos componentes em perigo (Adaptado de Zidko, 2008)	47
Quadro 9 - Modelo de construção de uma matriz de cenários (Adaptado de Zidko, 2008)	48
Quadro 10 - Identificação das vulnerabilidades (Adaptado de Zidko, 2008)	48
Quadro 11 - Tabela de frequências (Acevedo, 2002)	49
Quadro 12 - Tabela de Consequências (Acevedo, 2002).....	49
Quadro 13 - Matriz de Risco e Vulnerabilidade (Adaptado de Acevedo, 2002)	50
Quadro 14 - Critérios de aceitabilidade (Acevedo, 2002)	50
Quadro 15 - Matriz de aceitabilidade do risco (Acevedo, 2002)	51
Quadro 16 - Notas fornecidas à propriedade estrutural da conduta (Adaptado de Zidko, 2008).....	59
Quadro 17 – Notas fornecidas às cargas internas (Adaptada de Zidko, 2008)	60
Quadro 18 - Notas fornecidas à degradabilidade da conduta (Adaptado de Zidko, 2008).....	60
Quadro 19 – Exemplo da matriz de procura $A=(a_{ij})_{6 \times 1}$	64
Quadro 20 - Matriz de oferta $B=(b_{jk})_{n \times 6}$	65
Quadro 21 - Operador fuzzy (Nobre, 2006)	65
Quadro 22 - Dados estatísticos das cotas topográficas nos nós	69
Quadro 23 - Pressões e consumos por nós, para cada intervalo de tempo.....	73
Quadro 24 - Valores de desempenho	74
Quadro 25 - Valores ordenados por ordem crescente de desempenho (00:00h)	74
Quadro 26 - Valores ordenados por ordem crescente de desempenho (24:00h)	74
Quadro 27 - Consumo acumulado (00:00h).....	74
Quadro 28 - Consumo acumulado (24:00h).....	75
Quadro 29 - Lista de perigos/ameaças passíveis de ocorrerem no sistema em estudo	82
Quadro 30 - Nível de significância dos perigos do sistema em estudo	82
Quadro 31 - Componentes do sistema expostas aos perigos/ameaças	83
Quadro 32 – Matriz de cenários	83
Quadro 33 - Lista de vulnerabilidades do sistema em estudo	83
Quadro 34 - Tabela de frequências para os cenários.....	84
Quadro 35 - Tabela de consequências para os perigos considerados.....	84
Quadro 36 - Resultados para o risco e vulnerabilidade	85

Quadro 37 - Resultados de aceitabilidade	85
Quadro 38 - Matriz de procura $A=(a_{ij})_{6 \times 1}$	94
Quadro 39 - Dados de base da matriz de oferta.....	95
Quadro 40 - Matriz de oferta $B=(b_{jk})_{70 \times 6}$	97
Quadro 41 - Matriz Produto $C=(C_{ik})_{70 \times 1}$	99
Quadro 42 - Matriz de resultados ($\Delta=(\delta_{jk})_{70 \times 1}$)	100
Quadro 43 - Classes de desempenho do funcionamento do sistema	101
Quadro 44 – Hiearquização do índice de vulnerabilidade do sistema.....	102

1. INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

Os serviços de abastecimento de água são de importância crucial nas sociedades actuais. No entanto, estes serviços e respectivas infra-estruturas podem estar expostos a diferentes situações de perigo/ameaça natural (sismos, deslizamentos de terras, inundações, secas) e, também, a situações de perigo/ameaça não natural (vandalismo, corte/falha de energia, falha de equipamentos e falha das estruturas do sistema) que podem pôr em causa a eficácia e eficiência dos serviços.

A combinação das situações de perigo/ameaça com as vulnerabilidades dos sistemas de abastecimento de água, nomeadamente, as vulnerabilidades associadas ao período de vida, à variação das propriedades hidráulicas (pressão e velocidade) e, também, às propriedades estruturais das condutas, podem provocar o mau funcionamento do sistema ou mesmo a ruptura de condutas e acessórios e, conseqüentemente, a interrupção do abastecimento de água.

Para além dos efeitos directos sobre os consumidores, a redução da qualidade do serviço ou a interrupção do abastecimento de água pode perturbar o desempenho de instalações e equipamentos vitais, como hospitais e outros serviços de emergência. Pode, também, originar conseqüências sociais, riscos para a saúde pública e induzir perdas económicas em sistemas industriais e nas entidades gestoras do sector.

Deste modo, a reabilitação dos sistemas de abastecimento de água é vital, tanto para a garantia da continuação da função básica dos próprios sistemas, como para a minimização dos riscos associados, tanto ao nível técnico quanto ao nível financeiro, assim como na concretização dos principais objectivos das entidades gestoras (Zidko, 2008).

A reabilitação dos sistemas de abastecimento de água requer a monitorização dos sistemas e uma avaliação custo-benefício, que fundamente a decisão de intervenção.

Com este estudo, pretende-se aplicar uma metodologia integrada definida com base na avaliação do desempenho do sistema, na caracterização do risco, na avaliação da vulnerabilidade e no Modelo de Hierarquia Fuzzy que permita identificar e hierarquizar os componentes da rede de distribuição do sistema de

abastecimento de água com prioridade na intervenção, de modo a manter a operacionalidade do sistema dentro de níveis definidos como aceitáveis.

1.2 OBJECTIVOS

O presente estudo tem como objectivo a apresentação de uma metodologia para a análise e a avaliação da vulnerabilidade e do risco de sistemas de abastecimento de água e, posteriormente, a hierarquização das componentes da rede de distribuição do sistema de abastecimento de água em que é necessário intervir, através da aplicação do Modelo de Hierarquia Fuzzy. Esta metodologia é aplicada a um pequeno aglomerado do Alentejo, Corte da Velha.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia para apoio à decisão de reabilitação, pode ser sistematizada nas seguintes fases:

- (i) **avaliação do desempenho do sistema hidráulico em pressão**, com base em curvas de desempenho do sistema de abastecimento de água, que permitem analisar o comportamento do sistema relativamente às propriedades ou variáveis hidráulicas; a pressão e a velocidade de escoamento. A avaliação do desempenho do sistema é efectuada através de diagramas de simulação dinâmica para cada propriedade hidráulica e, por último, é aplicada uma função de generalização, que permite calcular valores agregados globais para o sistema de abastecimento de água em estudo;
- (ii) **caracterização do risco**, são identificados e analisados os perigos/ameaças e as vulnerabilidades do sistema em estudo, de forma a proceder-se à avaliação do risco com base em matrizes decisórias;
- (iii) **avaliação da vulnerabilidade**, com base num método semelhante ao utilizado na avaliação do desempenho do sistema, são definidas curvas de vulnerabilidade que representam o valor atribuído à vulnerabilidade com base nas variáveis hidráulicas (pressão e velocidade de escoamento). A avaliação da vulnerabilidade é efectuada através dos diagramas de simulação dinâmica para cada variável e, por último é aplicada uma função

de generalização, que permite calcular valores agregados globais para o sistema de abastecimento de água em estudo;

- (iv) **aplicação do Modelo de Hierarquia Fuzzy**, com base na construção de matrizes que representam, respectivamente, a procura e a oferta relativa a n factores e a m zonas elementares de vulnerabilidade, como possíveis alternativas de localização da ocorrência de uma ruptura ou interrupção do abastecimento hidráulico (Nobre, 2006). As diferentes componentes serão hierarquizadas com identificação do local a intervir em acções de reabilitação.

Como caso de estudo é aplicada a metodologia proposta ao sistema de abastecimento de água a Corte da Velha, um pequeno aglomerado que pertence ao concelho de Mértola, no distrito de Beja.

1.4 ESTRUTURA E CONTEÚDO

O texto está estruturado em cinco capítulos e uma listagem de referências bibliográficas.

Ao presente capítulo, introdutório, sucede-se o Capítulo 2 onde se efectua uma revisão bibliográfica dos temas fundamentais: a gestão do risco e a Lógica fuzzy.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia adoptada para alcançar o objectivo proposto, nomeadamente para a avaliação do desempenho de sistemas hidráulicos em pressão, caracterização do risco, avaliação da vulnerabilidade e a metodologia para hierarquizar os troços de conduta prioritários na reabilitação, através da aplicação do Modelo de Hierarquia Fuzzy.

No Capítulo 4 é caracterizado o sistema de abastecimento de água a Corte da Velha, usado como caso de estudo, e são apresentados os resultados da aplicação da metodologia descrita no capítulo anterior.

Por fim, no Capítulo 5 é apresentada a síntese do trabalho efectuado, as principais conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

2. SÍNTESE DE CONHECIMENTOS

2.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo consiste na apresentação de uma síntese de conhecimentos, sobre os principais temas do presente estudo, nomeadamente, a gestão do risco e a Lógica fuzzy.

Neste contexto, o capítulo inicia-se com a gestão do risco, em que, de acordo com a Norma *ISO/IEC Guide 73: 2008. Risk management – Vocabulary*, é definido o conceito de risco e os termos que lhe estão associados.

De seguida, tendo em consideração que a gestão do risco deve fazer parte da gestão global das entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água, referem-se, de acordo com a Norma *ISO/DIS 31000: 2008. Risk management – Principles and guidelines on implementation*, os princípios da gestão do risco e a abordagem de gestão do risco.

Posteriormente, é descrito todo o processo de gestão do risco, onde são caracterizadas as actividades deste processo, nomeadamente, a comunicação e consulta, o estabelecimento do contexto, a caracterização do risco (identificação do risco, análise do risco e avaliação do risco), tratamento do risco e monitorização do risco.

Para hierarquizar as componentes da rede de distribuição do sistema de abastecimento de água que apresentem maior índice de vulnerabilidade, através do Modelo de Hierarquia Fuzzy, é essencial ter conhecimento da lógica fuzzy. Neste sentido, é apresentada uma breve introdução histórica e algumas aplicações da lógica fuzzy em sistemas de água, bem como, os conceitos fundamentais dos conjuntos fuzzy e da lógica fuzzy e, ainda, algumas definições e operações.

2.2 GESTÃO DO RISCO

2.2.1 O CONCEITO DE RISCO

A avaliação do risco associado aos sistemas de abastecimento de água é de elevada importância por estar relacionada com a possível ocorrência de situações de perigo que, dependendo da vulnerabilidade do sistema a essas

situações de perigo, podem comprometer o eficiente funcionamento do sistema.

De acordo com a ISO/IEC Guide 73: 2008, o risco é o efeito da incerteza sobre os objectivos. O efeito da incerteza é o desvio positivo ou negativo em relação ao esperado. Os objectivos referem-se a metas a atingir ou a aspectos a concretizar, podendo ser de diversas naturezas (e.g., financeiros, ambientais, de saúde e segurança, de sustentabilidade) e corresponder a diferentes níveis de gestão (estratégico, tático e operacional).

O conceito de risco está associado a alguns termos, os quais são apresentados e definidos no Quadro 1.

Quadro 1 - Definição de termos relacionados com o conceito de risco (Adaptado de ISO/IEC Guide 73: 2008)

Termo	Definição / Observações
Evento	Ocorrência ou alteração de um conjunto particular de circunstâncias. A natureza, a probabilidade e a consequência de um evento podem não ser totalmente conhecidas. Um evento pode ter uma ou mais ocorrências e pode ter várias causas. A probabilidade associada ao evento pode ser determinada. Um evento pode constituir-se na não ocorrência de uma ou mais circunstâncias. Um evento com consequências é por vezes referido como incidente. Um evento pode resultar numa crise.
Probabilidade	Possibilidade de algo acontecer. Probabilidade refere-se à possibilidade de algo acontecer, que pode ser definida, medida ou determinada de forma objectiva ou subjectiva e descrita usando ou não termos matemáticos (como probabilidade ou frequência num dado período de tempo).
Perigo	Potencial fonte de danos. Um perigo pode ser uma fonte de risco.
Consequência	Resultado de um evento que afecta os objectivos. Um evento pode levar a um conjunto de consequências. Uma consequência pode acontecer ou não, com efeitos positivos ou negativos nos objectivos. As consequências podem ser descritas de forma qualitativa ou quantitativa.
Incerteza	Deficiência de informação relacionada com a compreensão ou o conhecimento de um evento, da sua consequência ou da sua probabilidade.
Vulnerabilidade	Propriedades intrínsecas que criam susceptibilidade ao risco e que podem ter consequências.

O risco é caracterizado pelos eventos que podem ocorrer, pelas suas consequências ou por uma combinação entre eventos e consequências.

Frequentemente, o risco é expresso pela seguinte expressão (Almeida, 2004 e Almeida, 2005):

$$\text{Risco} = \text{Probabilidade} \times \text{Consequências} \quad (2.1)$$

Na expressão 2.1 a probabilidade traduz uma expectativa de ocorrência de um perigo/ameaça e as consequências caracterizam a expectativa dos efeitos. Desta forma objectiva ou quantitativa, o risco é, numericamente, o valor expectável das consequências resultantes da ocorrência de perigos/ameaças. Da análise desta expressão verifica-se que uma situação de perigo que ocorre raramente, mas que, quando ocorre, provoca consequências gravosas, é quantificada da mesma forma que uma situação de perigo com maior probabilidade de ocorrência, mas de consequências menos gravosas. Este facto indica que o risco deve ter outras dimensões (Figura 1) subjectivas e sociais, a percepção individual ou social do risco pode não coincidir com o risco técnico ou quantitativo calculado com base na expressão 2.1.

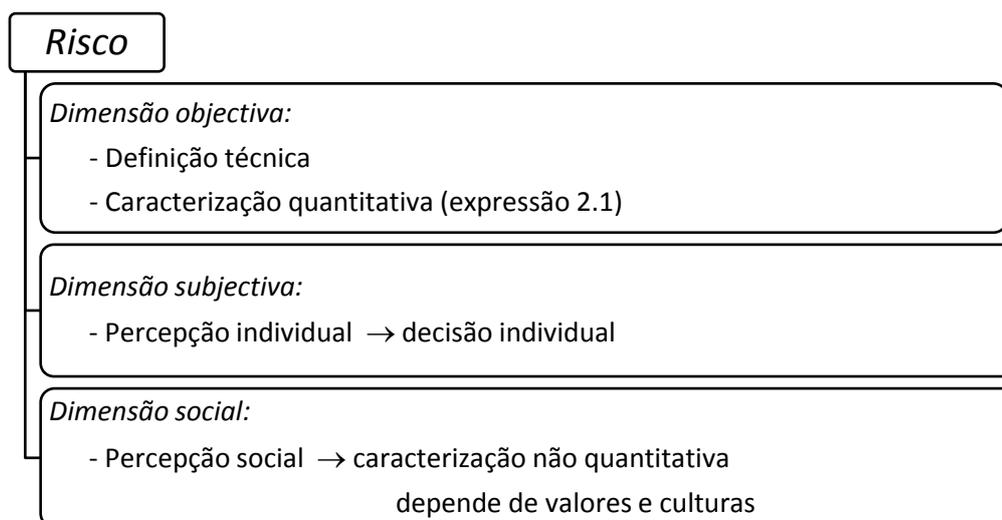


Figura 1 - Dimensões do conceito risco (Almeida, 2005)

2.2.2 PRINCÍPIOS DA GESTÃO DO RISCO

A gestão do risco é um conjunto de actividades coordenadas para gerir o risco (ISO/ICE Guide 73: 2008), constituindo um instrumento de apoio à tomada de decisão que tem em consideração a incerteza e as possíveis ocorrências futuras que possam ter impactos nos objectivos das entidades gestoras.

Para que o processo de gestão do risco seja mais eficaz, a entidade gestora deverá respeitar os princípios propostos na norma ISO/DIS 31000: 2008, isto é, a gestão do risco deve:

- contribuir para os objectivos e melhoria da organização;
- ser parte integrante do processo organizacional;
- contribuir para a tomada de decisão;
- incorporar a incerteza explicitamente;
- ser sistemática e estruturada;
- ser baseada na melhor informação disponível;
- ter em consideração os factores humanos;
- ser transparente e inclusiva;
- ser dinâmica, iterativa e adaptada às mudanças;
- ser sujeita a uma melhoria contínua.

2.2.3 ABORDAGEM DE GESTÃO DO RISCO

O sucesso da gestão de riscos vai depender da eficácia da abordagem de gestão, a Norma ISO/DIS 31000: 2008 propõe a abordagem de gestão do risco que se apresenta na Figura 2.

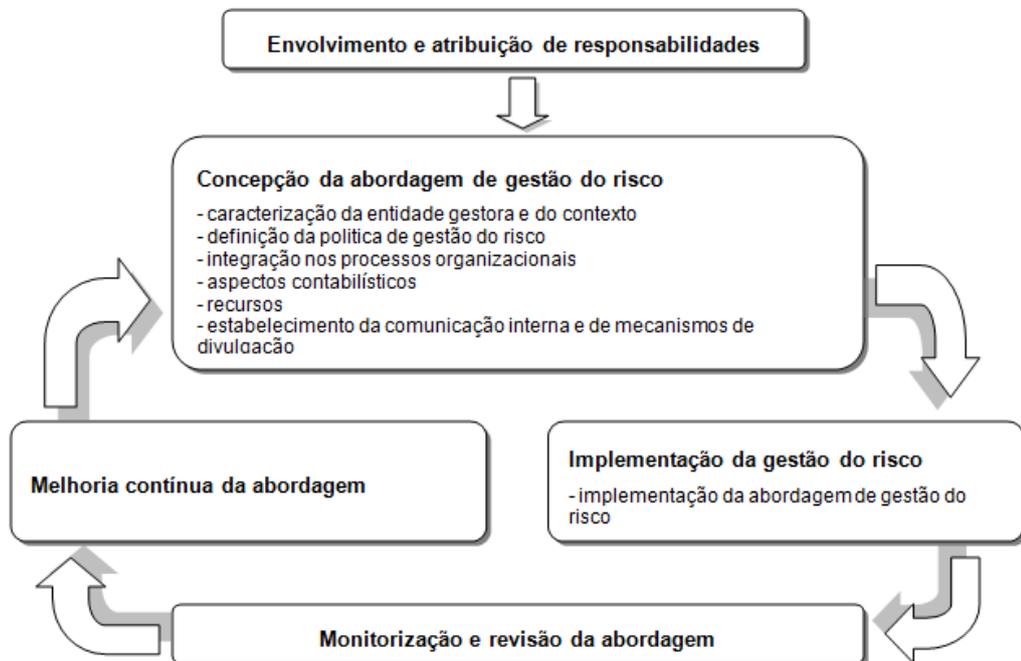


Figura 2 - Componentes da abordagem de gestão do risco (Adaptado da ISO/DIS 31000: 2008)

Esta abordagem de gestão do risco (Figura 2) não se destina a estabelecer um sistema de gestão do risco, mas sim a apoiar as entidades gestoras a integrar a gestão do risco no seu sistema de gestão global. Portanto, as entidades gestoras devem adaptar as componentes desta abordagem às suas necessidades específicas.

Todos os aspectos a observar em cada uma das componentes da abordagem encontram-se descritos na Norma ISO/DIS 31000: 2008.

2.2.4 PROCESSO DE GESTÃO DO RISCO

De acordo com a norma ISO/DIS 31000: 2008, o processo de gestão do risco deve fazer parte da gestão global da entidade gestora e inclui cinco actividades principais Figura 3:

- comunicação e consulta;
- estabelecimento do contexto;
- caracterização do risco (identificação do risco, análise do risco e avaliação do risco);
- tratamento do risco; e
- monitorização e revisão.

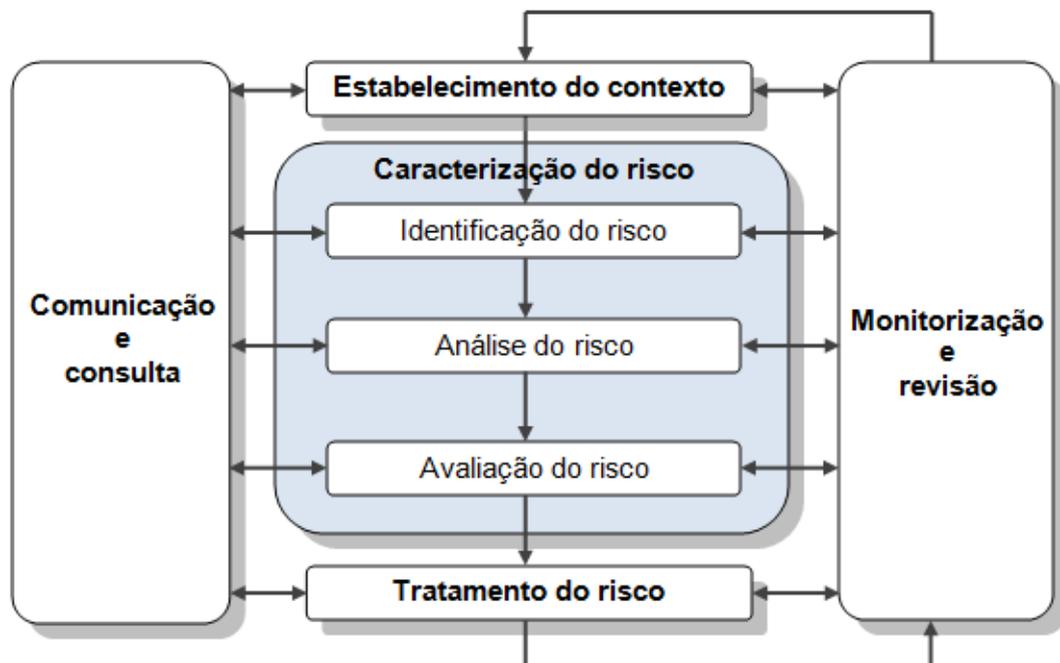


Figura 3 - Processo de gestão do risco (Adaptado da ISO/DIS 31000: 2008)

2.2.4.1 Comunicação e Consulta

A actividade de **comunicação e consulta**, interna e externa, deverá ser posta em prática em cada etapa do processo de gestão do risco, devendo ser desenvolvida no estágio inicial do processo de gestão do risco e incluir aspectos relacionados com o risco em si, com as suas causas e consequências (se conhecidas) e com as medidas de gestão adoptadas.

Quando é eficaz, a actividade de comunicação e consulta contribui para que todas as partes envolvidas na gestão do risco compreendam o fundamento das decisões tomadas e as razões por que algumas acções são necessárias. De acordo com a Norma ISO/DIS 31000: 2008, algumas das tarefas nesta actividade são:

- ajudar a definir correctamente o contexto;
- assegurar que os interesses de todos os intervenientes são considerados;
- utilizar áreas diferentes do conhecimento para a análise dos riscos;
- assegurar que os riscos são identificados de forma adequada;
- garantir que diferentes pontos de vista são considerados na avaliação dos riscos;
- apoiar uma gestão de mudança durante o processo de gestão do risco;
- apoiar e fundamentar um plano de tratamento do risco e desenvolver um plano adequado de comunicação e consulta, interna e externa.

A actividade de comunicação e consulta possibilita, aos intervenientes, julgamentos sobre o risco com base em suas percepções de risco. Estas percepções podem variar devido às diferenças de valores, necessidades, conceitos e preocupações dos intervenientes. No entanto, todas estas percepções devem ser identificadas, registadas e tidas em conta no processo de decisão (ISO/DIS 31000: 2008).

2.2.4.2 Estabelecimento do Contexto

O **estabelecimento do contexto** permite, à entidade gestora, definir as variáveis internas e externas a considerar na gestão do risco e estabelecer o âmbito e os critérios de gestão do risco, passando pela caracterização dos contextos externo e interno da sua actividade, do contexto em que será posto em prática o processo de gestão do risco e pela definição dos critérios de risco.

O **contexto externo** pode incluir (mas não está limitada a) aspectos como a envolvente cultural, política, legal, reguladora, financeira, tecnológica, económica, natural e competitiva, a nível local, regional, nacional ou internacional, os factores-chave e as tendências que poderão ter impacto nos objectivos da entidade gestora e as percepções e os valores de intervenientes externos (ISO/DIS 31000: 2008).

O **contexto interno** pode incluir (mas não está limitado a) aspectos da entidade gestora que possam facultar ou condicionar o processo de gestão do risco, como por exemplo: os recursos; a existência de sistemas e fluxos de informação; a identificação dos intervenientes internos; as políticas, os objectivos e as estratégias adoptadas para os atingir; as percepções, os valores e aspectos culturais; as normas e os modelos de referência adoptados; e a estrutura organizativa da entidade gestora (ISO/DIS 31000: 2008).

Interessa também perceber o **contexto do processo de gestão do risco**, que varia em função das necessidades da entidade gestora e que, de acordo com a Norma ISO/DIS 31000: 2008, pode envolver (mas não está limitado a):

- a definição das metas e objectivos a atingir com as actividades de gestão do risco;
- a definição das responsabilidades no processo de gestão do risco;
- a definição do âmbito e da extensão do processo;
- a definição da actividade da entidade gestora, do processo, da função, do projecto, do produto, serviço ou bem em termos temporais e geográficos;
- a definição das relações entre um projecto ou actividade específica com outras iniciativas da entidade gestora;
- a definição das metodologias de avaliação do risco;
- a definição das medidas de desempenho no âmbito do risco;
- a identificação e especificação de decisões a tomar;
- e a identificação e definição dos estudos necessários, sua extensão e objectivos, e os recursos necessários para estes estudos.

Estes e outros factores relevantes devem ajudar a garantir que a abordagem de gestão de risco adoptada é adequada, à entidade gestora e aos riscos que afectam os seus objectivos.

A entidade gestora deverá **estabelecer os critérios de risco**, para avaliar a significância do risco, no início do processo de gestão de risco e fazer a sua revisão de forma contínua. Os critérios de avaliação do risco reflectirão os valores, os objectivos e os recursos da entidade gestora, podendo alguns resultar de requisitos legais ou regulamentares, poderão, de acordo com a Norma ISO/DIS 31000: 2008, incluir aspectos como:

- a natureza e os tipos de consequências que poderão ocorrer e a forma de as medir;
- a forma como a possibilidade de ocorrência (probabilidade) é definida;
- o horizonte temporal da possibilidade de ocorrências e consequências;
- a forma de determinação do nível de risco;
- a aceitabilidade de cada nível de risco;
- o nível de risco mínimo para se proceder ao tratamento do risco;
- a combinação de diferentes riscos deve ser tratada.

2.2.4.3 Caracterização do Risco

A **caracterização do risco** é o processo global de identificação, análise e avaliação do risco.

Na **identificação do risco** são reconhecidas as origens de risco, as áreas afectadas, os eventos que o provocam e as suas consequências potenciais, com vista à elaboração de uma lista dos riscos resultantes de eventos que possam criar, reforçar, prevenir, diminuir, acelerar ou retardar o cumprimento dos objectivos das entidades gestoras do sector. A identificação dos riscos é uma fase crucial do processo de gestão do risco, porque um risco que não é identificado nesta fase não será incluído nas actividades seguintes.

De forma a identificar correctamente os riscos associados a um sistema de abastecimento de água, é importante compreender a relação entre a ocorrência de situações de perigo/ameaça e a vulnerabilidade destes sistemas. Uma vez que, a ocorrência de situações de perigo/ameaça (factor exógeno) associada à vulnerabilidade (factor endógeno), dos sistemas de abastecimento de água, podem originar danos nestes sistemas (Figura 4).



Figura 4 - Relação Perigo e Vulnerabilidade vs Dano (Adaptado: Zidko, 2008)

Os perigos/ameaças podem ser classificados quanto à sua origem em natural ou não natural, sendo estes últimos, ainda, classificados em intencionais ou não intencionais (Figura 5).

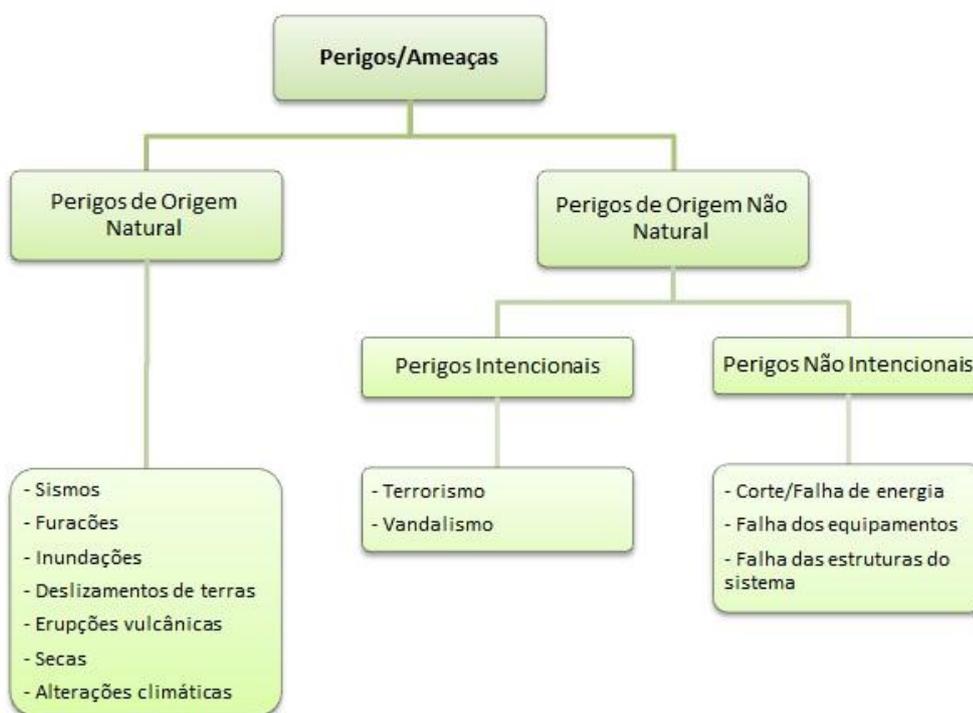


Figura 5 - Classificação dos Perigos/Ameaças

De acordo com Zidko (2008), na identificação das vulnerabilidades existem alguns factores a ter em consideração, nomeadamente, na vulnerabilidade das condutas componentes do sistema de abastecimento de água:

- a propriedade estrutural da conduta, tipo de material, idade, comprimento, diâmetro e qualidade da instalação;
- cargas internas devido às variações de pressão de serviço;
- cargas externas devido à sobrecarga do solo, interacção do solo/condutores, do tráfego e variações de temperatura;
- deterioração devido às interacções externas (reações químicas do solo e água no solo com o material da conduta) e interacções internas devido às reacções entre o material da conduta e as características da água transportada.

Na **análise do risco** são consideradas as origens e as causas do risco, a sua possibilidade de ocorrência e as respectivas consequências positivas e negativas. Identificam-se os factores que influenciam as possibilidades de ocorrência e as respectivas consequências. As formas de controlar os riscos e a sua eficácia devem também ser incluídas na análise do risco.

Um evento pode ter várias consequências e afectar vários objectivos. A forma de exprimir possibilidades de ocorrência e consequências, bem como a forma de as combinar para determinar níveis de risco, variam conforme o tipo de risco, a informação disponível e a utilização dos resultados da avaliação do risco. O grau de análise de risco depende igualmente destes factores e ainda dos recursos disponíveis (ISO/DIS 31000: 2008).

Os resultados da análise do risco poderão ser qualitativos, semi-quantitativos e quantitativos, ou uma combinação destes três tipos. Na prática, a análise qualitativa é usada numa primeira abordagem para fornecer uma ideia do nível de risco e para identificar os mais relevantes. No entanto, recomenda-se que seja feita posteriormente uma análise quantitativa sempre que possível e adequado. As consequências podem ser determinadas através da modelação das consequências dos eventos, por extrapolação de estudos experimentais ou através de dados disponíveis, e expressas através de impactos materiais ou não materiais.

Nos Quadro 2 e Quadro 3 são apresentadas, respectivamente, as consequências/danos dos perigos de origem natural e de origem não natural, que podem comprometer o bom funcionamento dos sistemas de abastecimento de água.

Quadro 2 - Potenciais Consequências/Danos dos perigos de origem natural (Adaptado: Zidko, 2008)

Perigos	Observações	Consequências/Danos
Sismos	<p>- O seu poder destrutivo depende da sua magnitude, intensidade, probabilidade de ocorrência, falhas sísmicas activas na zona em causa e tipos de solos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ao nível das estruturas de captação, tratamento, adução, armazenamento e distribuição; - Variações no volume/nível e localização da origem da água de abastecimento; - Interrupções de energia eléctrica, obrigando a uma paragem das estações elevatórias; - Alterações da qualidade de água devido a rupturas por deslizamentos de terras e contaminação da água em condutas que apresentam fissuras.
Furacões	<ul style="list-style-type: none"> - Associados aos furacões estão as precipitações intensas que poderão causar cheias e deslizamentos de terras; - Os danos estão relacionados com a velocidade do vento e as ondas do mar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Destruição total ou parcial das estruturas do sistema hidráulico, devido à força dos ventos ou da precipitação; - Danos nas componentes superficiais e equipamentos eléctricos devido às cheias; - Rupturas, de condutas e acessórios, causadas pelo assentamento do solo associado às inundações ou deslizamentos de terras; - Contaminação da água em reservatórios e condutas.
Cheias	<ul style="list-style-type: none"> - Podem ser causadas por precipitações intensas, furacões, subida do nível do mar em meio urbano ou pela fusão da neve; - O seu impacto é determinado pelo tipo de solo, topografia, precipitação e pelas características da bacia onde se origina a inundação. 	<ul style="list-style-type: none"> - Total ou parcial destruição das estruturas de captação nas linhas de água; - Sedimentos nos componentes do sistema; - Perda da utilidade da captação de água devido à mudança do curso do rio; - Ruptura de condutas expostas ao longo da linha de água; - Contaminação da água captada; - Danos no equipamento de bombagem e eléctrico.
Deslizamentos	<ul style="list-style-type: none"> - Podem ser causados por sismos, precipitações intensas, erupções vulcânicas e actividades humanas (e.g., desflorestação); - O seu impacto e previsão são em função da geologia do terreno, da topografia, da estabilidade do solo, da concentração de fissuras e de áreas onde poderá ocorrer liquefacção devido a sismos ou precipitações intensas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Total ou parcial destruição de componentes vitais do sistema, nomeadamente, estruturas de captação, adução e distribuição, localizadas ao longo de zonas propícias a deslizamentos de terras, principalmente em terrenos de declives acentuados; - Contaminação da água em captações superficiais em zonas de declives acentuados.

Erupções Vulcânicas	<p>- Os seus efeitos variam de acordo com o tipo de erupção vulcânica, a viscosidade do magma, a quantidade de gases libertos, o escoamento de lava, o tipo de cinzas produzidas e as características das áreas adjacentes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Total destruição dos componentes do sistema em áreas de impactos directo; - Obstrução por cinzas nas estruturas de captação e tratamento; - Degradação da qualidade da água devido às cinzas, poluição de rios e massas de água onde as cinzas possam cair.
Secas	<p>- A intensidade da seca é determinada, não apenas em função da quantidade de precipitação, mas também em função da quantidade de água nas albufeiras, lagos ou aquíferos, que permitem satisfazer as necessidades de água.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Perda ou diminuição do escoamento superficial e subterrâneo de água; - Racionamento ou suspensão do abastecimento de água; - Dependência de abastecimentos de água alternativos, com a conseqüente degradação da qualidade do serviço de abastecimento e aumento dos custos de produção; - Abandono do sistema por falta de fiabilidade.
Alterações Climáticas	<p>- Manifestam-se por aumento de temperatura, diminuição da precipitação anual média, aumento da frequência de ocorrência de eventos meteorológicos extremos e subida do nível médio da água do mar.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuição da qualidade da água na origem; - Galgamento de barragens; - Racionamento ou suspensão do abastecimento de água; - Aumento do consumo de água devido ao aumento da temperatura; - Inundação de zonas costeiras.

Quadro 3 - Potenciais Consequências/Danos dos perigos de origem não natural (Adaptado: Zidko, 2008)

	Perigos	Observações	Consequências/Danos
Perigos Intencionais	Terrorismo	- É quase impossível prever um ataque terrorista e, ainda, o tipo deste ataque.	- Contaminação biológica; - Contaminação química; - Rupturas e contaminação física; - atentado contra o sistema de controlo da rede de abastecimento.
	Vandalismo	- É quase impossível prever a sua ocorrência.	- Destruição de partes essenciais das estruturas de abastecimento; - Furtos de elementos ou de materiais eléctricos como transformadores, quadros de comando, cabos eléctricos...
Perigos Não Intencionais	Corte/Falha de Energia	- Paragem repentina dos grupos elevatórios que pode ter origem na fadiga do material e a sua gradual deterioração.	- Ocorrência do golpe de aríete; - Interrupção no abastecimento de água.
	Falha dos Equipamentos	- Devido à falta de manutenção dos equipamentos mecânicos ou eléctricos, ou mesmo defeito de fabrico; - Redução do tempo de vida útil dos equipamentos e sua gradual deterioração.	- Falhas no abastecimento de água em termos de quantidade e qualidade.
	Falhas das Estruturas do Sistema	- Podem ocorrer, principalmente, nos reservatórios e condutas.	- Fugas e rupturas.

A **avaliação do risco** permite a combinação de informações relativas às infra-estruturas, incluindo as suas vulnerabilidades, com os vários tipos de perigo que lhe poderão causar danos, com o objectivo de enumerar e classificar com níveis de risco as zonas e componentes do sistema (Zidko, 2008). Deste modo, a avaliação do risco permite apoiar a tomada de decisão relativa à necessidade de reabilitação, com vista à definição de prioridades de intervenção.

A avaliação do risco consiste na comparação dos níveis de risco determinados na fase de análise do risco com os critérios de risco estabelecidos na definição do contexto, devendo ser tratados os riscos cujos níveis não respeitem os respectivos critérios. De acordo com a apetência ao risco e com a atitude perante o risco, a entidade gestora poderá também decidir manter o risco ou controlá-lo (ISO/DIS 31000: 2008).

2.2.4.4 Tratamento do Risco

O **tratamento do risco** envolve a selecção de uma ou mais opções para modificar o nível de risco e a sua implementação. Ao tratar um risco, espera-se diminuir as suas consequências ou a sua probabilidade de ocorrência até atingir o chamado risco residual. O processo é cíclico, ou seja, procede-se à avaliação do tratamento do risco e definição do nível de risco residual que é tolerável, se não for tolerável, adopta-se um outro tratamento de risco, até que o risco residual cumpra os critérios de tolerabilidade ao risco, estabelecidos pela entidade gestora.

De acordo com a Norma ISO/DIS 31000: 2008, as opções de tratamento do risco não são necessariamente mutuamente exclusivas ou adequadas a todas as circunstâncias, estas opções podem ser de vários tipos:

- evitar o risco através da não realização ou da suspensão da actividade que lhe dá origem;
- arriscar uma oportunidade, mesmo iniciando ou continuando uma actividade que reforce o risco;
- anular a origem do risco;
- mudar a natureza da possibilidade de ocorrência;
- alterar as consequências;
- partilhar o risco com outras partes;

- manter o risco por opção.

A selecção das opções mais adequadas para o tratamento de riscos deve atender a análises custo-benefício tendo em conta requisitos legais, regulamentares, responsabilidade social e protecção do ambiente. As decisões devem também ter em conta os riscos que, embora, economicamente não seja justificável o seu tratamento, podem justificar um tratamento, por exemplo, os riscos que apresentam uma baixa possibilidade de ocorrência, mas que, quando ocorrem, provocam consequências gravosas. Há opções de tratamento de risco que podem ser consideradas e aplicadas individualmente ou em conjunto. Por outro lado, os intervenientes nos processos e na actividade da entidade gestora deverão ser incluídos na selecção das opções do tratamento do risco, em especial quando estão sujeitos a impactos decorrentes do risco, sendo imprescindível uma comunicação adequada (ISO/DIS 31000: 2008).

O tratamento do risco pode introduzir novos riscos. A falha das medidas de tratamento do risco adoptadas ou a sua falta de eficácia constituem por si só um risco significativo. É essencial fazer a monitorização dos planos de tratamento do risco para assegurar a sua eficácia. Há ainda riscos secundários que terão de ser avaliados, tratados, monitorizados e revistos, devendo ser incorporados no mesmo plano de tratamento que os riscos originais, com a identificação clara das relações entre os dois tipos de risco.

Os planos de tratamento do risco indicam a forma como as opções de tratamento do risco são implementadas e deverão incluir pelo menos a seguinte informação (ISO/DIS 31000: 2008):

- benefícios esperados;
- medidas de desempenho e suas restrições;
- identificação dos responsáveis pela aprovação do plano e pela sua execução;
- acções propostas;
- requisitos de monitorização e de comunicação;
- recursos necessários;
- cronograma de actividades e prazos.

A entidade gestora e os intervenientes, no processo de gestão do risco, devem estar cientes da natureza e dimensão do risco residual após o tratamento do

risco. O risco residual deve ser estudado, monitorizado, revisto e quando necessário tratado.

2.2.4.5 Monitorização e Revisão

A **monitorização e a revisão** do processo de gestão do risco devem ser especificamente planeadas e assumidas por responsáveis. De acordo com a Norma ISO/DIS 31000: 2008, esta actividade permitirá:

- analisar os eventos, as mudanças introduzidas e as tendências, e aprender com a experiência;
- detectar alterações nos contextos interno e externo, incluindo alterações no próprio risco que requeiram a revisão do tratamento do risco e das prioridades de intervenção identificadas;
- assegurar a eficácia do controlo e do tratamento do risco;
- identificar novos riscos esperados.

Os resultados da monitorização e revisão devem ser registados e comunicados externamente e internamente conforme o caso, e devem ser usados como um contributo para a revisão do processo de gestão do risco.

2.3 LÓGICA FUZZY

2.3.1 INTRODUÇÃO

Uma característica do pensamento humano é lidar com factores como a ambiguidade, incerteza e informações imprecisas na resolução de problemas, em que é usado o conhecimento adquirido e experiências para lidar com estes factores (Klir *et al.*, 1997 e Mukaidono, 2001). Nos problemas de difícil solução, em que é necessário o auxílio matemático/computacional, a modelação de tais factores é extremamente difícil. Não é possível calcular a incerteza com base em modelação computacional convencional (Mukaidono, 2001). A precisão computacional também é limitada, deixando sempre uma margem, por mínima que seja, para a incerteza (Klir *et al.*, 1997). Para tratar as informações imprecisas, Zadeh (1965), concebeu a Teoria dos conjuntos fuzzy, baseada na lógica fuzzy.

Contrariamente à lógica clássica, que considera que uma declaração só pode ser falsa ou verdadeira, não podendo ser ao mesmo tempo parcialmente verdadeira e parcialmente falsa, a lógica fuzzy considera valores de pertinência (grau de verdade) intermédios entre os valores verdadeiro e falso.

A lógica fuzzy pode ser aplicada, por exemplo, na construção de sistemas especializados para descrever termos imprecisos como: idade (jovem, velho), tamanho (grande, médio, pequeno), velocidade (rápido, lento), quantidade (muito, razoável, pouco), *etc.*. Para tal, a lógica fuzzy apresenta as seguintes características (Zidko, 2008):

- tem por base palavras e não números, ou seja, os valores *verdade* são expressos linguisticamente (*e.g.*, quente, frio, longe, perto, grande, pequeno, rápido, lento, *etc.*);
- possui vários modificadores de predicado (*e.g.*, muito, mais ou menos, pouco, bastante, médio, *etc.*);
- possui um amplo conjunto de quantificadores (*e.g.*, poucos, vários, em torno de, *etc.*);
- faz uso das probabilidades linguísticas (*e.g.*, provável e improvável, que são interpretados como números fuzzy e manipulados pela sua aritmética);
- usa todos os valores entre 0 e 1, tomando estes apenas como um limite.

2.3.2 BREVE INTRODUÇÃO HISTÓRICA

Desde o início da ciência moderna até ao fim do século XX a incerteza representava um estado indesejável, um estado que devia ser evitado a todo o custo (Ross, 2004). Esta atitude foi-se gradualmente alterando com o surgimento dos mecanismos estatísticos. Para lidar com grandes complexidades de processos mecânicos no nível molecular, os mecanismos estatísticos permitiam o uso de médias e a teoria das probabilidades era aplicada com sucesso em várias áreas da ciência. Mesmo assim, a teoria das probabilidades não era capaz de tratar a incerteza em todas as suas manifestações (Klir *et al.*, 1997).

Aristóteles (384 – 322 a.C.), filósofo grego, criou a lógica clássica tendo como base três princípios fundamentais: (i) Princípio da identidade – todo objecto é idêntico a si mesmo; (ii) Princípio da não contradição – uma proposição não pode ser verdadeira e falsa ao mesmo tempo; e (iii) Princípio do terceiro excluído – toda a proposição é verdadeira ou falsa, não havendo outra possibilidade.

Uma das características da lógica clássica é não existir alternativa para um valor além do par {*Verdadeiro*, *Falso*}. Ao lidar com problemas do mundo real, no entanto, verifica-se que o conhecimento disponível não é nem absolutamente verdadeiro nem absolutamente falso, podendo ser, por exemplo paradoxais, incertos, desconhecidos, indeterminados, verdadeiros em geral, verdadeiros com uma certa probabilidade, etc. Para estender a lógica clássica de maneira a permitir o tratamento deste tipo de conhecimento, é necessário alterar o conjunto de valores {*Verdadeiro*, *Falso*} (Zidko, 2008).

Na década de 1930, questionando o princípio da não contradição, Jan Łukasiewicz desenvolveu uma lógica multinível (Ross, 2004), em que considerou que uma determinada afirmação pode ser verdadeira ou falsa, ao mesmo tempo. Tal consideração, apenas, é possível desde que não apresente apenas dois níveis (verdadeiro e falso), mas sim um grau de verdade, existindo assim vários níveis (Kohagura, 2007).

Em 1965, Lotfi Zadeh, professor da Universidade da Califórnia, verificou que na presença de situações ambíguas, os recursos tecnológicos disponíveis eram incapazes de dar resposta a problemas de natureza industrial, biológica ou química. Procurando solucionar esses problemas e com base na lógica

multinível, Lotfi Zadeh introduziu a lógica fuzzy no contexto científico (Zadeh, 1965).

A lógica fuzzy torna-se importante na medida que permite representar valores de pertinência (grau de verdade) intermediários entre os valores verdadeiro e falso da lógica clássica (Zidko, 2008). A lógica fuzzy é assim, uma generalização da lógica clássica que permite incluir a incerteza nos processos decisórios. Apesar de ter sido criticada inicialmente, a lógica fuzzy acabou por ser bem aceite por engenheiros e cientistas de computação, tornando-se comum a sua aplicação.

2.3.3 APLICAÇÕES DA LÓGICA FUZZY AOS SISTEMAS DE ÁGUA

Chang e Chang (2006) aplicaram o modelo ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), para prever o nível de água de uma albufeira, com uma antecedência de 1-3 horas, durante os períodos de cheia. Os resultados obtidos demonstram que o modelo ANFIS pode ser aplicado com êxito para estabelecer modelos de previsão do nível da água no reservatório. Estes resultados fornecem uma orientação útil ou de referência nas operações de controlo de cheias.

Posteriormente, Yurdusev e Firat (2009) aplicaram o modelo ANFIS na previsão do consumo de água mensal de Izmir (terceira maior cidade da Turquia). Neste estudo, os factores socioeconómicos (população, número de habitações, conta média mensal do consumo de água, produto interno bruto e taxa de inflação) e climáticos (temperatura, precipitação e humidade) foram usados como variáveis de entrada do modelo ANFIS, sendo a variável de saída o consumo de água mensal. Os resultados obtidos demonstram que o modelo ANFIS pode ser aplicado com êxito na previsão do consumo de água mensal.

Firat *et al.* (2009) compararam o desempenho de dois modelos de inferência fuzzy (modelo ANFIS e o modelo Mamdani Fuzzy Inference Systems – MFIS), na previsão do consumo de água mensal, tendo como caso de estudo, a cidade de Izmir. Neste estudo, as variáveis de entrada foram os registos históricos do consumo de água mensal, sendo a previsão do consumo de água mensal para o futuro a variável de saída. Os resultados obtidos demonstraram que o desempenho do modelo ANFIS é superior ao modelo MFIS e confirmaram as

conclusões de Yurdusev e Firat (2009); o modelo ANFIS pode ser aplicado com êxito na previsão do consumo de água mensal.

Nobre (2006) desenvolveu uma metodologia inovadora para a avaliação do risco de contaminação de aquíferos, através da modelação conceptual. A inovação neste estudo foi a aplicação do Modelo de Hierarquia Fuzzy, baseado na lógica fuzzy, para hierarquizar as potenciais zonas de risco de contaminação de aquíferos.

Em 2008, Zidko adaptou o modelo desenvolvido por Nobre (2006) e aplicou-o à avaliação da vulnerabilidade dos sistemas de abastecimento de água. Neste estudo, foi desenvolvida uma análise inicial, tendo em consideração alguns tipos de perigos/ameaças susceptíveis de ocorrer nas infra-estruturas dos sistemas de abastecimento de água, bem como, as vulnerabilidades destas infra-estruturas. Esta análise foi, posteriormente, utilizada para definir os parâmetros ou atributos do Modelo de Hierarquia Fuzzy. Este modelo, associado à gestão operacional dos sistemas de abastecimento de água, é um instrumento de grande utilidade na identificação e na avaliação das zonas e componentes do sistema que, na ocorrência de uma situação de perigo/ameaça e de acordo com a sua vulnerabilidade, necessitem de reabilitação.

Camboim (2008) desenvolveu um controlador fuzzy que, através de um conversor de frequência, controla de forma automática a pressão, mantendo um valor constante na rede de distribuição de água, independentemente do consumo de água. Os benefícios, desta acção, são a diminuição do desgaste das peças, das perdas de água, da perda de carga e, principalmente, diminuição dos custos com a energia. De referir que, da aplicação, em laboratório, da metodologia proposta neste estudo, a redução no consumo de energia foi de 27%, sem comprometer o desempenho do sistema de distribuição de água.

2.3.4 CONJUNTOS FUZZY

2.3.4.1 Teoria dos Conjuntos Fuzzy

Na teoria de conjuntos clássica, um elemento pertence ou não a um conjunto. Dado um conjunto A em um universo X , os elementos deste universo

simplesmente pertencem ou não pertencem a este conjunto. Isto pode ser expresso pela função característica f_A :

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (2.2)$$

Zadeh (1965) propôs uma caracterização mais ampla, generalizando a função característica de modo que ela pudesse assumir um número infinito de valores no intervalo $[0,1]$. Um conjunto fuzzy A , em um universo X , é definido por uma função de pertinência $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$ e é representado por um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{\mu_A(x)/x\} \quad x \in X \quad (2.3)$$

onde $\mu_A(x)$ representa o grau com que x pertence ao conjunto A . Um determinado elemento pode pertencer a mais de um conjunto fuzzy, com diferentes graus de pertinência.

O conjunto suporte de um conjunto fuzzy A é o conjunto de elementos no universo X para os quais $\mu_A(x) > 0$. Um conjunto fuzzy cujo suporte é um único ponto x' com $\mu_A(x')=1$ é chamado de conjunto unitário fuzzy ou *singleton*. Assim, um conjunto fuzzy também pode ser visto como o mapeamento do conjunto suporte no intervalo $[0,1]$, o que implica em expressar o conjunto fuzzy por sua função de pertinência (Tanscheit, 2009).

Conjuntos fuzzy podem ser definidos em universos contínuos ou discretos. Se o universo X for discreto e finito, o conjunto fuzzy A é normalmente representado:

- por um vector contendo os graus de pertinência no conjunto A dos elementos correspondentes de X ;
- por meio da seguinte notação (que não deve ser confundida com a soma algébrica):

$$\sum_{i=0}^n \mu_A(x_i)/x_i \quad (2.4)$$

Se o universo X for contínuo, a expressão 2.4 deve ser substituída pela expressão 2.5:

$$\int_x \mu_A(x) / x \quad (2.5)$$

2.3.4.2 Variáveis Linguísticas

Uma das grandes vantagens do uso da lógica fuzzy é a possibilidade de transformar linguagem natural em conjuntos de números, permitindo a manipulação computacional. Zadeh definiu variáveis linguísticas como variáveis em que os valores são palavras ou sentenças em linguagem natural ou artificial. As variáveis linguísticas assumem valores chamados linguísticos, como por exemplo, a temperatura de um dado processo pode ser uma variável linguística assumindo os seguintes valores: *baixa*, *média*, *alta*, etc (Gomide *et al.*, 1995). Estes valores são descritos através de conjuntos fuzzy (Figura 6).

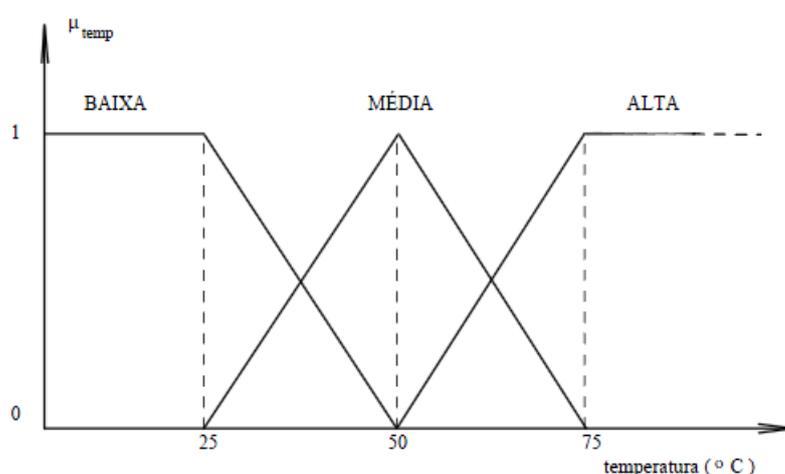


Figura 6 - Variável linguística temperatura (Gomide *et al.*, 1995)

Segundo os mesmos autores (Gomide *et al.*, 1995), os valores de uma variável linguística podem ser sentenças em uma linguagem específica, construídas a partir de termos primários (i.e., *alto*, *baixo*, *grande*, *médio*, *pequeno*), de conjuntos lógicos (i.e., *não*, *e* e *ou*), de modificadores (i.e., *muito*, *pouco*, *levemente*, *extremamente*) e de delimitadores (como parênteses).

As variáveis linguísticas têm como principal função fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos (Tanscheit, 2009). Deste modo, a utilização do tipo de descrição linguística utilizada pelo Homem, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados através de termos matemáticos convencionais.

Uma variável linguística é totalmente caracterizada por uma quintupla $(x, T(x), U, G, M)$. O nome da variável é x . O conjunto dos *termos linguísticos* de x é $T(x)$,

ou simplesmente T , que se refere a uma *variável base* u , cujos valores estão no conjunto universo U . G é uma *regra sintáctica*, para a geração dos *termos linguísticos*. M é uma *regra semântica*, que associa a cada *termo linguístico* $t \in T$ o seu significado, $M(t)$, que é um conjunto *fuzzy* em U (Zimmermann, 1991).

No caso da variável temperatura da Figura 6, ter-se-ia:

x – temperatura;

$T(x)$ – {baixa, média, alta};

U – 0 a 100 °C (por exemplo);

G – temperatura não muito baixa e não muito alta, por exemplo;

M – associa o valor acima a um conjunto fuzzy cuja função de pertinência exprime o seu significado.

2.3.4.3 Funções de Pertinência

Uma componente crucial de um conjunto fuzzy é uma função de pertinência, e muitas operações são definidas em conformidade com a mesma (Zadeh, 1965).

Tanscheit (2009) afirma que, dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto, as funções de pertinência podem ter diferentes formas. Para exemplificar o quanto o contexto é relevante na definição das funções de pertinência e de sua distribuição ao longo de um dado universo, considere-se a variável linguística *estatura* (de pessoas), constituída dos seguintes termos: $T(\text{estatura}) = \{\text{baixa}, \text{média}, \text{alta}\}$. A estes termos faz-se corresponder os conjuntos fuzzy A , B e C , respectivamente, definidos por suas funções de pertinência. Uma escolha possível de funções de pertinência é apresentada na Figura 7.

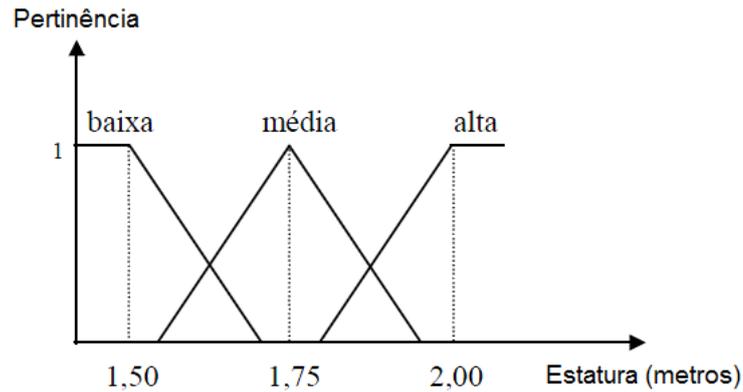


Figura 7 - Funções de pertinência para a variável estatura (Tanscheit, 2009)

A definição das funções de pertinência é efectuada a partir da experiência e da perspectiva do usuário, mas é comum fazer-se uso de funções de pertinência padrão, como, por exemplo, as de forma triangular, trapezoidal e Gaussiana. Em função dos resultados observados, as formas inicialmente escolhidas podem sofrer ajustes.

As **funções de pertinência contínuas** podem ser definidas por intermédio de funções analíticas (Tanscheit, 2009). Por exemplo, a expressão (2.6) apresenta uma função geral que pode ser usada para definir as funções de pertinência associadas aos conjuntos fuzzy, correspondentes aos termos *pequeno*, *médio* e *grande*:

$$\mu_A(x) = (1 + (a(x - c))^b)^{-1} \quad (2.6)$$

A forma $\mu_A(x)$ pode ser modificada através da manipulação dos três parâmetros a , b e c . Por exemplo:

$$\mu_{pequeno}(x) = (1 + 9x^2)^{-1} \quad (2.7)$$

$$\mu_{médio}(x) = (1 + 9(x - 0.5)^2)^{-1} \quad (2.8)$$

$$\mu_{grande}(x) = (1 + 9(x - 2)^2)^{-1} \quad (2.9)$$

As **funções de pertinência descontínuas** são compostas de segmentos contínuos lineares, resultando em formas triangulares ou trapezoidais. As funções de pertinência discretizadas consistem em conjuntos de valores discretos correspondendo a elementos discretos do universo. Em que, se $X = \{0,1,2,3,4,5,6\}$, uma representação possível é:

$$\mu_{pequeno}(x) = \{0,3; 0,7; 1; 0,7; 0,3; 0; 0\} \quad (2.10)$$

$$\mu_{médio}(x) = \{0; 0; 0,3; 0,7; 1; 0,7; 0,3\} \quad (2.11)$$

$$\mu_{grande}(x) = \{0; 0; 0; 0; 0,3; 0,7; 1\} \quad (2.12)$$

Conforme se pode verificar o grau de pertinência para a representação do conjunto $X=\{0,1,2,3,4,5,6\}$ corresponde aos números pares, e crescem e decrescem à medida que os valores se aproximam ou se afastam dos valores de pertinência igual a 1 (e.g.: $\mu_{pequeno}=1$, para o número 2; $\mu_{médio}=1$, para o número 4 e, finalmente, $\mu_{grande}=1$, para o número 6) (Zidko, 2008).

2.3.4.4 Propriedades

As principais operações entre conjuntos fuzzy são definidas como uma extensão das operações clássicas, como pode ser observado no Quadro 4, onde A e B denotam conjuntos fuzzy sobre um conjunto base X e $A(x)$ e $B(x)$ representam os graus de pertinência de x nos conjuntos fuzzy A e B respectivamente.

Quadro 4 - Operações com conjuntos fuzzy

Operação	Representação
Complemento	$\neg A(x) = 1 - A(x)$
Diferença	$(A \neq B)$ se $A(x) \neq B(x)$ para pelo menos um elemento de $x \in X$
Igualdade	$(A = B)$ se $A(x) = B(x)$ para todo $x \in X$
Inclusão	$(A \subseteq B)$ se $A(x) \leq B(x)$ para todo $x \in X$
Intersecção	$A \cap B = A(x) \cap B(x) = \min[A(x), B(x)]$
União	$A \cup B = A(x) \cup B(x) = \max[A(x), B(x)]$

2.3.4.5 Relações Fuzzy

De acordo com Tanscheit (2009), nos conjuntos clássicos uma relação exprime a presença ou a ausência de uma associação (ou interação) entre elementos de dois ou mais conjuntos. Neste sentido, dados dois universos X e Y , a relação R definida em $X \times Y$ é um subconjunto do produto cartesiano do dois universos, de tal forma que $R : X \times Y \rightarrow \{0,1\}$. Ou seja, se algum $x \in X$ e $y \in Y$ estiverem relacionados, $R(x,y)=1$; caso contrário, $R(x,y)=0$. Isto pode ser expresso pela seguinte função característica (ou função de pertinência bivalente):

$$f_R(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } (x, y) \in R \\ 0 & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad (2.13)$$

Nos conjuntos fuzzy as relações fuzzy generalizam o conceito de relações e representam o *grau da associação* entre elementos de dois ou mais conjuntos fuzzy. Exemplos de carácter linguístico seriam: x é *muito maior* do que y , x está *próximo* de y . Formalmente, dados dois universos X e Y , a relação fuzzy R é um conjunto fuzzy em $X \times Y$, caracterizada por uma função de pertinência $\mu_R(x, y) \in [0,1]$ onde $x \in X$ e $y \in Y$.

A intersecção e a união de *relações fuzzy* são definidas de forma similar às mesmas operações com conjuntos fuzzy. Considerando-se duas relações fuzzy R e S definidas em um mesmo espaço $X \times Y$, as funções de pertinência resultantes são:

$$\mu_{R \cap S}(x, y) = \mu_R(x, y) \times \mu_S(x, y) \quad (2.14)$$

$$\mu_{R \cup S}(x, y) = \mu_R(x, y) + \mu_S(x, y) \quad (2.15)$$

2.3.4.6 Composição de Relações

Tanscheit (2009) afirma que a composição de relações representa um papel muito importante em sistemas de inferência fuzzy. Considerando duas relações *não-fuzzy* $P(X, Y)$ e $Q(Y, Z)$ que têm um conjunto (Y) em comum, a composição destas duas relações é definida como um subconjunto $R(X, Z)$ de $X \times Z$ tal

que $(x, z) \in R$ se e somente se existe pelo menos um $y \in Y$ tal que $(x, y) \in P$ e $(y, z) \in Q$, e é denotada por: $R(X, Z) = P(X, Y) \times Q(Y, Z)$.

Sejam as relações *não-fuzzy* definidas pelas seguintes matrizes relacionais:

$$P(X, Y) = \begin{matrix} & y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad Q(Y, Z) = \begin{matrix} & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \\ \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

A composição destas duas relações é:

$$R(X, Z) = \begin{matrix} & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

A operação realizada para se obter $R(X, Z)$ pode ser representada por qualquer uma (embora não somente) das expressões 2.16 (composição *max-min*) e 2.17 (composição *max-produto*):

$$f_R(x, z) = f_{P \circ Q}(x, z) = \{(x, z), \max_y [\min(f_P(x, y), f_Q(y, z))]\} \quad (2.16)$$

$$f_R(x, z) = f_{P \circ Q}(x, z) = \{(x, z), \max_y [(f_P(x, y) f_Q(y, z))]\} \quad (2.17)$$

Ao aplicar a composição *max-min* ao cálculo do elemento (x_1, z_2) de R , obtêm-se:

$$\begin{aligned} f_R(x_1, z_2) &= f_{P \circ Q}(x, z) = \{(x_1, z_2), \max_y [\min(f_P(x_1, y), f_Q(y, z_2))]\} \\ &= \{(x_1, z_2), \max [\min(f_P(x_1, y_1), f_Q(y_1, z_2)), \min(f_P(x_1, y_2), f_Q(y_2, z_2)), \\ &\quad \min(f_P(x_1, y_3), f_Q(y_3, z_2)), \min(f_P(x_1, y_4), f_Q(y_4, z_2))]\} \\ &= \{(x_1, z_2), \max[\min(0,0), \min(1,0), \min(0,1), \min(1,0)]\} \\ &= \{(x_1, z_2), \max[0,0,0,0]\} = 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

Outra forma de realizar as operações anteriormente apresentadas consiste em efectuar a “multiplicação” das matrizes relacionais, mas substituindo cada multiplicação pela operação *min* e cada adição pelo operador *max*. Se, em vez de *min*, for usado o *produto*, o resultado será o mesmo (Tanscheit, 2009).

De acordo com Tanscheit (2009) a **composição de relações fuzzy** é definida de maneira análoga à apresentada anteriormente; a expressão para a função de pertinência resultante da composição de duas relações fuzzy com um conjunto fuzzy em comum é generalizada para:

$$\mu_R(x, z) = \mu_{P \circ Q}(x, z) = \sup_y [\mu_P(x, y) * \mu_Q(y, z)] \quad (2.19)$$

onde a norma-t (representada por *) é normalmente o *min* ou o *produto*, embora seja permitido usar outras normas-t. No caso de *universos finitos*, *sup* é o *maximum*.

De referir que, o supremum (*sup*) é o menor limite superior de um conjunto S e não tem de pertencer, necessariamente, a este conjunto; um limite superior que pertence ao conjunto é denominado de maximum (*max*). Se o conjunto tiver um *máximo*, obviamente terá um *supremum*.

Existe ainda o caso especial em que a relação *P* é *um conjunto fuzzy* apenas, de forma que, em vez de $\mu_P(x, y)$, tem-se $\mu_P(x)$. Isto é equivalente a se ter $X=Y$ e a composição torna-se somente uma função de *z*, denotada pela função de pertinência 2.20.

$$\mu_R(z) = \sup_x [\mu_P(x) * \mu_Q(x, z)] \quad (2.20)$$

Do ponto de vista operacional, tem-se a “multiplicação” de um vector por uma matriz, observando-se as substituições adequadas de operadores, cujo resultado é um vector.

2.3.4.7 Proposições Fuzzy

Uma proposição fuzzy é uma frase da forma Π é *A*, onde Π é o nome de uma variável linguística e *A* é um conjunto fuzzy definido no universo de discurso *U* de Π (Gomide *et al.*, 1995).

Segundo Gomide *et al.* (1995) as proposições fuzzy podem ser combinadas por meio de diferentes operadores, por exemplo, através dos conectivos lógicos e e ou, a negação *não* e o operador de implicação *se... então*. As proposições fuzzy resultantes podem ser descritas em termos de relações fuzzy.

Em geral, o conectivo *e* é usado com variáveis em diferentes universos, enquanto que o conectivo *ou* é usado com variáveis do mesmo universo. Quando o conectivo *ou* é usado para conectar variáveis em uma sentença do tipo *se... então*, pode ser usado com duas variáveis diferentes. Por exemplo: *se a pressão é alta ou a velocidade é elevada então o controle é zero* (Tanscheit, 2009).

A operação *não* é considerada como semanticamente sinónima da negação em linguagem natural:

$$A = \{\mu_A(x)/x\} \Rightarrow \text{não } A = \{(1 - \mu_A(x))/x\} \quad (2.21)$$

Por exemplo, sejam as variáveis linguísticas de nomes x e y com universos de discurso X e Y , respectivamente. Sejam A e B conjuntos fuzzy em X e Y , respectivamente. Por fim, sejam as seguintes proposições fuzzy (x é A) e (y é B). Conectando-se as duas proposições com o operador *ou*, tem-se a proposição fuzzy (x é A) ou (y é B), que pode ser expressa por uma relação fuzzy $R_{A \text{ ou } B}$, cuja função de pertinência é dada por $\mu_{R_{A \text{ ou } B}}(x, y) = \mu_A(x) + \mu_B(y)$.

Caso as proposições sejam conectadas por *e*, a função de pertinência da relação $R_{A \text{ e } B}$ é dada por $\mu_{R_{A \text{ e } B}}(x, y) = \mu_A(x) \times \mu_B(y)$.

O operador *se... então* é também conhecido como declaração condicional fuzzy. Este operador descreve a dependência do valor de uma variável linguística em relação a uma outra. Em muitas aplicações essas declarações condicionais são simplesmente denominadas *regras linguísticas*, constituindo-se em frases de forma *se x é A então y é B* . Uma frase deste tipo é normalmente denominada **implicação** e é representada por uma relação $R_{A \rightarrow B}$, expressa pela função de pertinência:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = f_{\rightarrow}(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (2.22)$$

onde f_{\rightarrow} é o operador de implicação.

Quando uma declaração condicional apresenta mais do que uma variável antecedente (x é A), as diversas variáveis são geralmente combinadas por meio do conectivo *e*:

$$\text{se } (x_1 \text{ é } A_1) \text{ e } (x_2 \text{ é } A_2) \text{ e } \dots \text{ e } (x_m \text{ é } A_m) \text{ então } (y \text{ é } B) \quad (2.23)$$

que pode ser representada por uma relação expressa pela seguinte função de pertinência:

$$\mu_R(x_1, x_2 \dots \dots x_m, y) = f_{\rightarrow}(f_e(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2) \dots \dots \mu_{A_m}(x_m)), \mu_B(y)) \quad (2.24)$$

onde f_e é o operador (geralmente *min* ou *produto*) que representa o conectivo e.

Várias declarações podem ser combinadas por meio do conectivo *ou*:

R^1 : se (x é A^1) então (y é B^1) ou

R^2 : se (x é A^2) então (y é B^2) ou

⋮

(2.25)

R^n : se (x é A^n) então (y é B^n)

A função de pertinência do conjunto R^N de declarações é:

$$\begin{aligned} \mu_{R^N}(x, y) &= f_{ou}[\mu_{R^1}(x, y), \mu_{R^2}(x, y) \dots \dots \mu_{R^n}(x, y)] \\ &= f_{ou}[f_{\rightarrow}(\mu_{A^1}(x), \mu_{B^1}(y)), f_{\rightarrow}(\mu_{A^2}(x), \mu_{B^2}(y)) \dots \dots f_{\rightarrow}(\mu_{A^n}(x), \mu_{B^n}(y))] \end{aligned} \quad (2.26)$$

Observe-se a distinção feita nas notações para o caso de se ter mais de um antecedente e para a existência de várias frases do tipo *se ... então*. Na primeira situação, tem-se várias variáveis, cada uma delas com seus valores, e apenas um valor (B) para o *consequente* (y é B). Na segunda, a variável é a mesma em todos os antecedentes e os valores da variável do consequente são distintos (Gomide *et al.*, 1995 e Tanscheit, 2009).

2.3.5 SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY

Na Figura 8 é ilustrado um Sistema de Inferência Fuzzy, onde estão identificadas as funções de cada bloco.

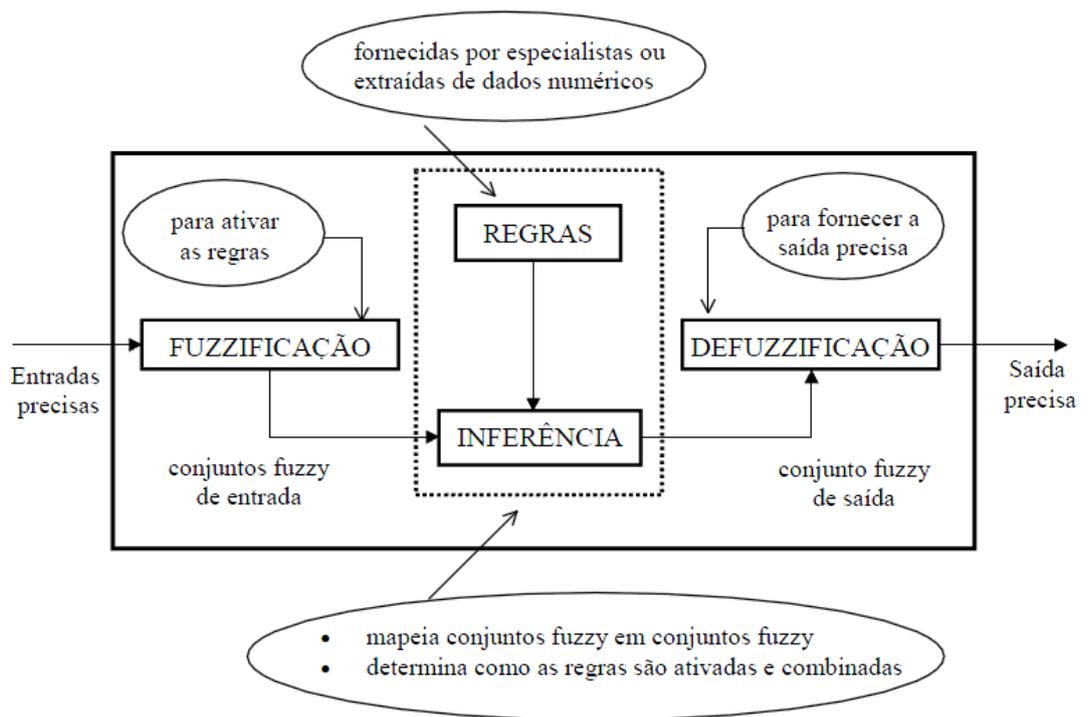


Figura 8 - Sistema de Inferência Fuzzy (Tanscheit, 2009)

Neste sistema de inferência fuzzy, Tanscheit (2009), considera como entradas precisas ou não-fuzzy os conjuntos de dados resultantes de medições ou observações. Assim, é necessário efectuar-se um mapeamento destes dados precisos para os conjuntos fuzzy (de entrada) relevantes, o que é realizado na fase de **fuzzificação**. Nesta fase ocorre também a activação das regras relevantes para uma dada situação.

Uma vez obtido o conjunto fuzzy de saída através do processo de inferência, na fase de **defuzzificação** é efectuada uma interpretação dessa informação. Os dois métodos de defuzzificação mais utilizados, dos vários descritos na literatura, são o centro de gravidade e a média dos máximos. Neste último, a saída precisa é obtida tomando-se a média entre os dois elementos extremos no universo que correspondem aos maiores valores da função de pertinência do consequente. Com o centro de gravidade, a saída é o valor no universo que divide a área sob a curva da função de pertinência em duas partes iguais.

As **regras** podem ser fornecidas por especialistas, em forma de sentenças linguísticas, e se constituem em um aspecto fundamental no desempenho de um sistema de inferência fuzzy. Extrair regras de especialistas na forma de sentenças do tipo *se... então* pode não ser uma tarefa fácil, por mais conhecedores que sejam do problema em questão. Alternativamente ao uso de

especialistas para a definição da base de regras, existem métodos de extração de regras de dados numéricos. Estes métodos são particularmente úteis em problemas de classificação e previsão de séries temporais.

Na fase de **inferência** ocorrem as operações com conjuntos fuzzy propriamente ditas: combinação dos *antecedentes* das regras, *implicação* e *modus ponens* generalizado. Os conjuntos fuzzy de entrada, relativos aos antecedentes das regras, e o de saída, referente ao consequente, podem ser definidos previamente ou, alternativamente, gerados automaticamente a partir dos dados.

Um aspecto importante é a definição dos conjuntos fuzzy correspondentes às variáveis de entrada (antecedentes) e à(s) variáveis de saída (consequente(s)), pois o desempenho do sistema de inferência dependerá do número de conjuntos e de sua forma.

3. METODOLOGIA

3.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIDRÁULICO DE SISTEMAS EM PRESSÃO

3.1.1 INTRODUÇÃO

A metodologia de avaliação do desempenho técnico de sistemas hidráulicos em pressão, que se apresenta de seguida, é a metodologia proposta por Coelho *et al.* (2006), que é composta por três etapas (Figura 9):

- (i) **identificação da propriedade ou variável hidráulica** que se considere representativa do aspecto em análise (*e.g.*, pressão e velocidade de escoamento);
- (ii) **definição da curva de penalidade** que permite classificar o desempenho técnico do sistema desde o serviço nulo até ao óptimo, para cada variável hidráulica;
- (iii) **determinação de uma função de generalização** que permite a agregação espacial dos valores elementares da propriedade ou variável hidráulica considerada num único valor, que represente o desempenho global do sistema.

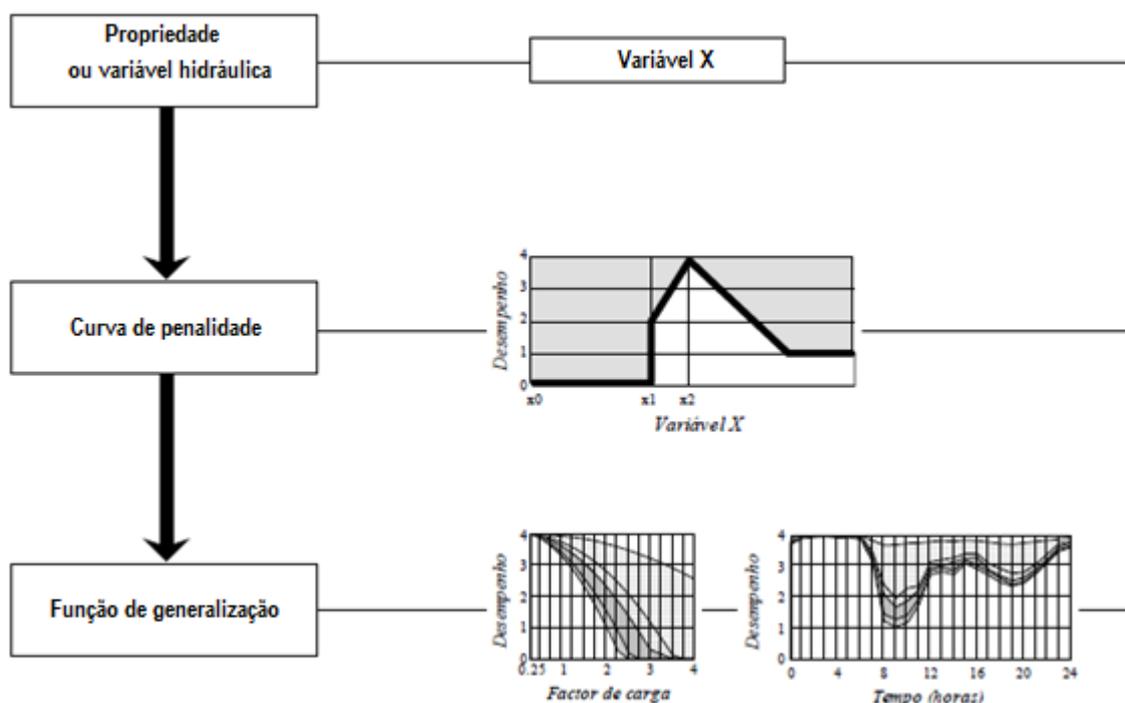


Figura 9 – Principais etapas da avaliação do desempenho de sistemas de saneamento básico (Adaptado de Coelho *et al.*, 2006)

3.1.2 PROPRIEDADE OU VARIÁVEL HIDRÁULICA

O valor numérico da propriedade ou variável hidráulica traduz o comportamento do sistema, ao nível dos nós ou troços de conduta, em relação ao aspecto analisado. De acordo com Vidigal (2008), o valor da propriedade ou variável hidráulica deve ser sujeito a alterações, mediante as alterações das condições operacionais do sistema, e deve situar-se entre um valor mínimo e um valor máximo.

As propriedades ou variáveis de estado utilizadas, para a avaliação de desempenho do sistema de abastecimento de água, são a pressão nos nós e a velocidade de escoamento nos troços.

3.1.3 CURVAS DE PENALIDADE

3.1.3.1 Considerações Gerais

A curva de penalidade relaciona os valores da propriedade ou variável hidráulica, ao nível elementar do nó ou troço de conduta, com a respectiva classificação em termos de desempenho ou nível de serviço, designada por índice de desempenho (Vidigal, 2008).

O índice de desempenho varia entre a ausência de serviço (desempenho nulo) e o serviço óptimo (desempenho máximo), e as curvas destinam-se a penalizar, qualquer desvio do serviço óptimo (Coelho *et al.*, 2006).

A escala de desempenho, adoptada, classifica o desempenho do sistema de 0% a 100%, em que:

- 100% - serviço óptimo;
- 75% - serviço adequado;
- 50% - serviço minimamente aceitável (limiar de aceitabilidade);
- 25% - serviço inaceitável;
- 0% - ausência/interrupção do serviço.

3.1.3.2 Pressão de Serviço

As variações de pressão, induzidas pelas variações de consumo e por manobras no equipamento hidromecânico, aumentam a frequência do aparecimento de rupturas e reduzem a vida útil das infra-estruturas de abastecimento de água.

De acordo com o artigo 21º do Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais (RGSPDADAR), a pressão em qualquer ponto de utilização não deve ser superior a 600kPa (≈ 60 mc.a.), nem ser inferior ao valor obtido através da expressão 3.1. Também, não são aceitáveis grandes flutuações de pressão em cada nó do sistema, impondo-se uma variação máxima de 300kPa (≈ 30 mc.a.).

O valor da pressão mínima, regulamentado pelo RGSPDADAR, está relacionado com a garantia de abastecimento em quantidade e conforto em qualquer nó da rede, uma vez que, a pressão inferior ao valor regulamentado, pode pôr em causa o caudal no consumidor e em caso de depressões na rede pode causar instabilidade hidráulica ou permitir a contaminação do sistema, comprometendo a qualidade da água. Deste modo, a pressão mínima é definida pela altura máxima dos edifícios a serem abastecidos, em conformidade com a alínea e), do ponto 1, do artigo 21.º do RGSPDADAR:

$$p_{\min} = 10 + 4n \quad (3.1)$$

sendo: p_{\min} – pressão mínima de serviço (mc.a.);

n – número de pisos acima do solo, incluindo o piso térreo.

Quanto à pressão máxima admissível, as preocupações prendem-se com os seus efeitos a nível da resistência estrutural da conduta.

As flutuações excessivas da pressão podem estar associadas a elevadas variações da condição de escoamento na exploração do sistema e, consequentemente, causar desconforto aos consumidores (Vidigal, 2008).

Relativamente às curvas de penalidade para a pressão (Figura 10 a), adoptadas no presente estudo, o desempenho nulo (0%) corresponde a situações em que a pressão é inferior a 10mc.a., que é a pressão mínima admissível, uma vez que abaixo deste valor o abastecimento em boas condições não está garantido num

piso acima do solo. À pressão de 30mc.a. corresponde o desempenho óptimo do sistema (100%), uma vez que flutuações de pressão acima de 30mc.a. (a soma da pressão mais a flutuação é igual à pressão máxima) podem comprometer a estrutura física das condutas. Com o desvio do desempenho óptimo, as penalizações aumentam com o aumento da pressão, verificando-se uma queda de desempenho menos acentuada nos primeiros 20mc.a. acima da pressão de 30mc.a.. Deste modo, à pressão de 50mc.a. corresponde um desempenho adequado (75%), com o aumento da pressão o desempenho do sistema vai diminuindo, correspondendo um desempenho inaceitável (25%) para os 65mc.a.. Acima deste valor, considera-se que o desempenho se mantém em 25%, uma vez que as exigências de consumo são satisfeitas, embora possam existir elevados volumes de perda e, provavelmente, um gasto desnecessário de energia (Zidko, 2008).

Relativamente às situações intermédias, os valores de desempenho podem ser obtidos por interpolação linear.

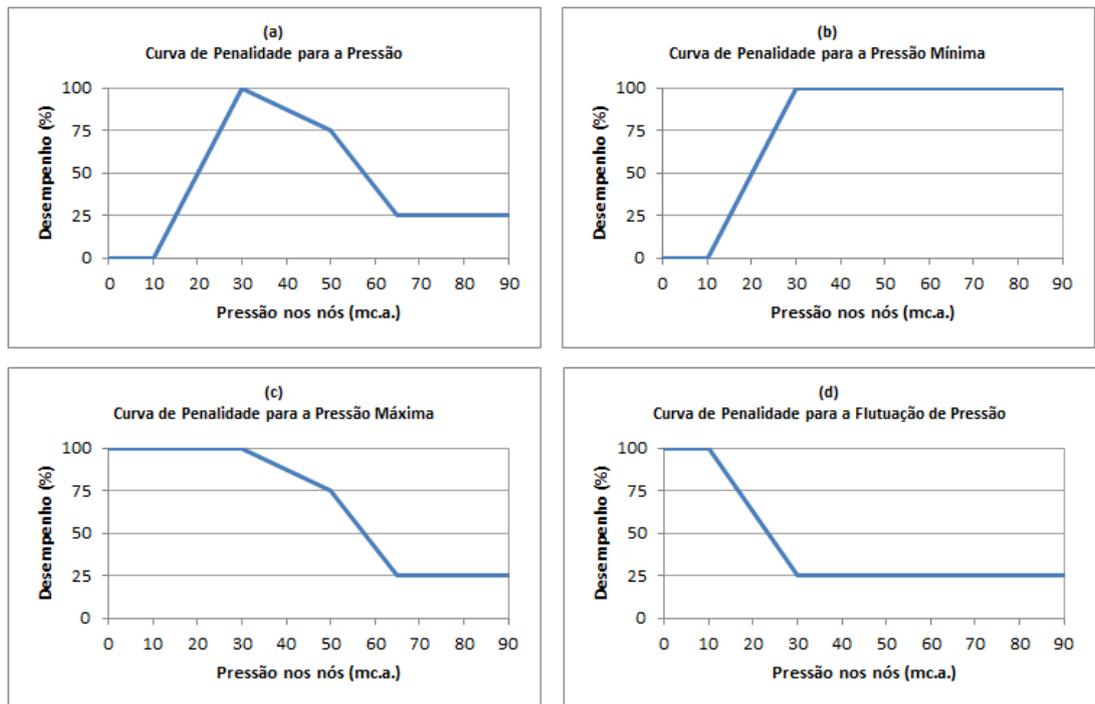


Figura 10 - Curvas de penalidade para (a) a pressão, (b) a pressão mínima, (c) a pressão máxima e (d) a flutuação de pressão (adoptadas de Jacob, 2006)

A curva de penalidade para a pressão quando detecta uma falta de desempenho no domínio das pressões não permite explicar a natureza do problema, ou seja, não detecta se é um problema de pressões mínimas ou

máximas. Assim, para que o problema de falta de desempenho seja explicitamente identificado, recorre-se ao desdobramento da curva de pressão global em duas, penalizando separadamente as pressões mínimas (Figura 10 b) e as pressões máximas (Figura 10 c).

Relativamente, à curva de penalidade para a flutuação de pressão (Figura 10 (d)) o desempenho óptimo corresponde às situações em que as flutuações de pressão são mínimas, neste sentido para as flutuações de pressão até aos 10mc.a. o desempenho do sistema é óptimo. Com o aumento das flutuações de pressão o desempenho diminui linearmente, correspondendo o desempenho inaceitável (25%) às flutuações de pressão de 30mc.a.. Para valores de flutuação de pressão superiores a 30mc.a. o desempenho mantém-se inaceitável.

3.1.3.3 Velocidade de Escoamento

As velocidades elevadas do escoamento nas condutas podem-se traduzir em elevadas variações na pressão quando ocorrem regimes variáveis, derivados da operação de órgãos de manobra do sistema, ou numa cedência estrutural das condutas. No entanto, as velocidades baixas podem traduzir tempo de residência da água na tubagem muito elevado e a criação de depósitos de sedimentos no interior das condutas e, conseqüentemente, implicações na qualidade da água (Vidigal, 2008). Deste modo, a velocidade de escoamento nas condutas deverá estar compreendida entre um limite máximo e um limite mínimo admissíveis, de forma a garantir o bom funcionamento do sistema de abastecimento de água.

Neste sentido, o RGSPDADAR (artigo 21.º), estabelece que a velocidade de escoamento, para o caudal de ponta no horizonte de projecto, não deve exceder o valor calculado pela seguinte expressão:

$$V_{ref} = 0,127 D^{0,4} \quad (3.2)$$

sendo: V_{ref} – velocidade limite (m/s);

D – diâmetro interno da tubagem (mm).

O RGSPDADAR (artigo 21.º) estabelece, também, que a velocidade de escoamento, para o caudal de ponta no ano de início de exploração do sistema, não deve ser inferior a 0,30 m/s.

A curva de penalidade para a velocidade de escoamento (Figura 11 a), foi definida em função da velocidade de referência, obtida pela expressão 3.2.

Tendo em conta que, as velocidades inferiores ao limite mínimo admissível (0,3 m/s) podem sofrer alterações repentinas (e.g., provocadas pela abertura de uma torneira no período nocturno) e atingirem valores razoáveis num curto espaço de tempo, mas suficiente para promover o varrimento das condutas, evitando assim eventuais problemas de qualidade da água. Deste modo, nestas situações não é atribuído o desempenho nulo (0%), mas sim o desempenho inaceitável (25%) (Zidko, 2008).

A partir deste valor o desempenho aumenta, correspondendo à velocidade mínima admissível o desempenho adequado (75%), seguindo a mesma tendência até atingir o desempenho óptimo (100%) para a velocidade de referência.

Acima da velocidade de referência, o desempenho diminui linearmente até um desempenho inaceitável (25%) para o dobro da velocidade de referência. Esta penalização no desempenho deve-se aos riscos de dano estrutural das condutas, inerentes ao aumento da velocidade. Com o aumento da velocidade, o desempenho diminui, até se tornar nulo (0%) para o triplo da velocidade de referência.

Os valores de desempenho correspondente a situações intermédias podem ser obtidos por interpolação linear.

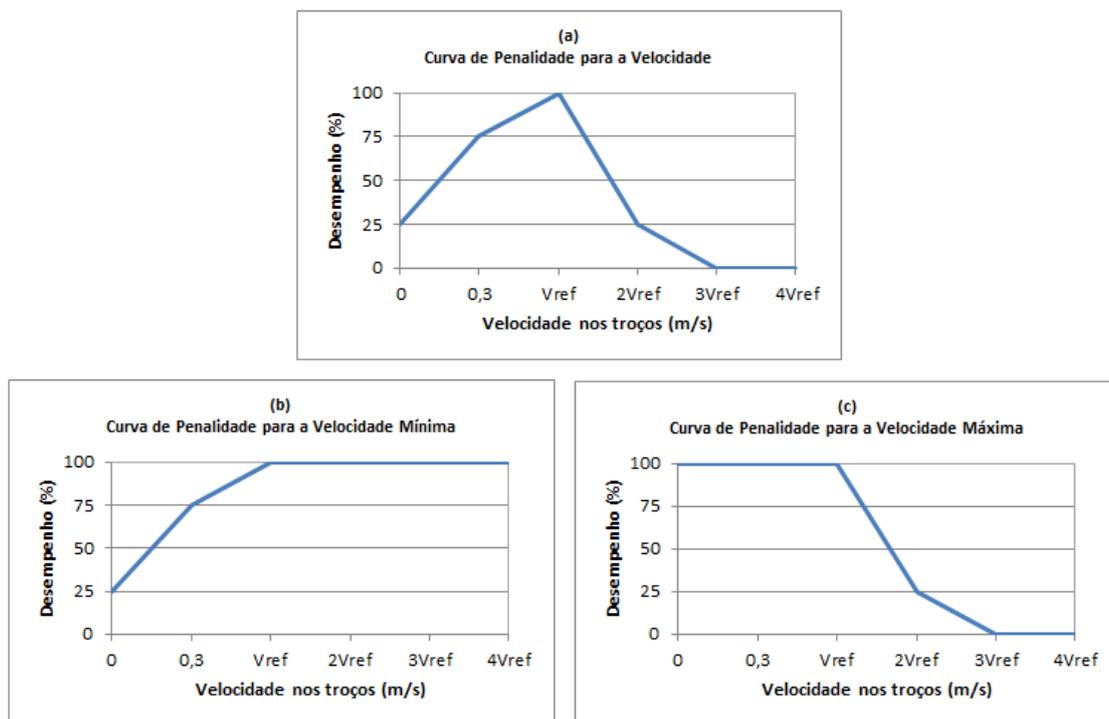


Figura 11 - Curvas de penalidade para (a) a velocidade, (b) a velocidade mínima e (c) a velocidade máxima (adoptadas de Jacob, 2006)

À semelhança do que foi efectuado para a pressão, a curva de penalidade da velocidade foi desdobrada em duas curvas independentes, uma para a velocidade mínima (Figura 11 b) e outra para a velocidade máxima (Figura 11 c), permitindo uma análise mais específica, de forma a facilitar a identificação da origem dos problemas existentes.

3.1.4 FUNÇÕES DE GENERALIZAÇÃO

3.1.4.1 Considerações Gerais

Depois de quantificado o desempenho para cada elemento em causa (*i.e.*, nó ou troço de conduta), aplica-se uma função de generalização que permite agregar estes valores para a globalidade do sistema em análise.

A função de generalização consiste num operador que, aplicado aos valores de desempenho elementares obtidos, permite determinar o valor do desempenho global do sistema, relativamente à propriedade ou variável hidráulica em análise.

3.1.4.2 Pressão de Serviço

Uma vez que a pressão e a flutuação de pressão têm relevância para o consumo afecto a cada subsistema, justifica-se atribuir a cada valor do desempenho nodal, um peso proporcional ao consumo do referido nó (Zidko, 2008). Neste sentido, a função de agregação (w), utilizada na função generalizadora dos desempenhos de pressão, conforme a expressão 3.3, é uma média ponderada pelos consumos nodais e cujo peso nodal é dada pela expressão 3.4.

$$P_p = \sum_{i=1}^N (w_{pi} \times pm_{pi}) \quad (3.3)$$

$$w_{pi} = \frac{Q_i}{\sum_{j=1}^N Q_j} \quad (3.4)$$

sendo: P_p – desempenho de pressão global (%);
 N – número de nós do sistema (-);
 w_{pi} – peso do desempenho de pressão no nó i (-);
 pm_{pi} – desempenho de pressão no nó i (%);
 Q_i – consumo no nó i (l/s).

3.1.4.3 Velocidade de Escoamento

Para a velocidade do escoamento também se utiliza uma média ponderada como função de agregação e, de forma a ter em conta o comprimento e o diâmetro das condutas, utiliza-se o volume do troço como factor de ponderação (Vidigal, 2008). Deste modo, a função de agregação (w) utilizada na função generalizadora dos desempenhos da velocidade (expressão 3.5), corresponde a uma média ponderada em função dos volumes dos troços das condutas e cujo peso de cada troço é dado pela expressão 3.6.

$$P_v = \sum_{i=1}^N (w_{vi} \times pm_{vi}) \quad (3.5)$$

$$w_{vi} = \frac{D_i^2 \times L_i}{\sum_{j=1}^N (D_j^2 \times L_j)} \quad (3.6)$$

sendo: P_v – desempenho da velocidade global (%);
NL – número de troços do sistema (-);
 w_{vi} – peso do desempenho da velocidade no troço i (-);
 pm_{vi} – desempenho da velocidade no troço i (%);
 D_i – diâmetro do troço i (m);
 L_i – comprimento do troço i (m).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO RISCO

A metodologia de caracterização do risco que se apresenta de seguida tem por base a elaboração de matrizes decisórias propostas por Acevedo (2002) e é composta pela identificação, análise e avaliação do risco.

3.2.1 IDENTIFICAÇÃO DO RISCO

De uma forma geral, a identificação do risco consiste na identificação dos perigos/ameaças, a que um sistema de abastecimento de água se encontra sujeito. A identificação do risco é uma fase crucial da caracterização do risco, uma vez que um perigo/ameaça que não é identificado nesta fase não é considerado nas fases seguintes.

Neste sentido, o primeiro passo para uma correcta identificação do risco é a elaboração de uma lista de referência onde se identificam todos os perigos/ameaças passíveis de ocorrer no sistema de abastecimento de água.

No Quadro 5 é apresentada, como exemplo, uma lista de perigos/ameaças passíveis de ocorrerem em sistemas de abastecimento de água.

Quadro 5 - Lista de perigos passíveis de ocorrer

Código	Perigo
P1	Cheias
P2	Falha de energia
P3	Falta de água
P4	Vandalismo
Pn	...

3.2.2 ANÁLISE DO RISCO

Como referido anteriormente, a análise do risco consiste na análise das origens do risco, na sua probabilidade de ocorrência e as respectivas consequências dos perigos/ameaças identificados no subcapítulo anterior.

Os perigos/ameaças listados anteriormente afectam de forma diferenciada o funcionamento do sistema de abastecimento de água. Assim, de forma a traduzir esta diferenciação é atribuído a cada perigo/ameaça um nível de significância.

A significância de cada perigo/ameaça é determinada através da matriz de significância (Quadro 6), que relaciona duas variáveis: tamanho relativo do perigo/ameaça e o potencial dos danos, que representam, respectivamente, a probabilidade de ocorrência e as consequências dos perigos/ameaças.

O tamanho relativo do perigo/ameaça é estabelecido de acordo com os seguintes critérios: se é *Baixo* atribui-se o valor 1; se é *Médio* atribui-se o valor 2; e se é *Alto* atribui-se o valor 3. Por exemplo, em zonas onde as inundações não são representativas, o tamanho relativo poderia ser baixo.

O potencial dos danos é estabelecido de acordo com os seguintes critérios: se é *Baixo* atribui-se o valor 1; se é *Médio* atribui-se o valor 2; e se é *Alto* atribui-se o valor 3. Por exemplo, embora as inundações não sejam representativas, quando ocorrem podem causar um forte impacto no sistema, provocando a interrupção no abastecimento de água durante algumas horas, portanto, o potencial do dano pode ser alto.

Quadro 6 - Matriz de Significância dos perigos/ameaças (Acevedo, 2002)

Tamanho relativo do perigo/ameaça	Alto – 3	3	6	9
	Médio – 2	2	4	6
	Baixo – 1	1	2	3
		Baixo – 1	Médio – 2	Alto – 3
		Potencial dos danos		

A significância de cada perigo é determinada através do produto entre o tamanho relativo do perigo/ameaça e o potencial dos danos.

A correspondência entre o valor obtido na matriz de significância dos perigos/ameaças (Quadro 6), e o nível de significância é dada pelo Quadro 7.

Quadro 7 - Classificação da significância do perigo (Acevedo, 2002)

Índice	Nível de Significância
De 1 a 2 inclusive	Não significativo
De 3 a 4 inclusive	Significativo
De 6 a 9 inclusive	Muito significativo

De seguida, procede-se à identificação das componentes do sistema de abastecimento de água que possam estar expostos aos perigos/ameaças considerados, anteriormente, com um nível de significância significativo ou muito significativo.

Um possível cenário dos componentes de um sistema de abastecimento de água expostos a perigos/ameaças é apresentado no Quadro 8.

Quadro 8 - Identificação dos componentes em perigo (Adaptado de Zidko, 2008)

Código	Componentes
C1	Zona de captação
C2	Estações elevatórias
C3	Adutores
C4	Estações de Tratamento (ETA)
C5	Reservatórios
C6	Rede de distribuição – Conduatas e acessórios
C7	Ramais de Ligação
Cn	...

Posteriormente, procede-se à definição dos possíveis cenários de risco com vista à elaboração de uma matriz de cenários.

Entende-se por cenário a criação de situações com maior ou menor probabilidade de ocorrer que neste caso cruzam a exposição de um componente a um determinado perigo/ameaça. Os cenários são obtidos através do cruzamento das informações dos perigos/ameaças considerados significativos ou muito significativos com os componentes do sistema considerados expostos aos perigos (Quadro 8).

No Quadro 9 apresenta-se um exemplo de uma matriz de cenários.

Quadro 9 - Modelo de construção de uma matriz de cenários (Adaptado de Zidko, 2008)

Código	Perigos	Componentes expostas							
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Cn
		Tomada de Água	Estações Elevatória	Adutores	ETA	Reservatórios	Rede de Distribuição	Ramais de Ligação	...
P1	Cheias	P1-C1	P1-C2	P1-C3	P1-C4	-	-	-	
P2	Falha de energia	-	P2-C2	P2-C3	P2-C4	-	P2-C6	P2-C7	
P3	Falta de água	-	P3-C2	-	-	-	P3-C6	P3-C7	
P4	Vandalismo	-	P4-C2	-	-	P5-C5	-	-	
Pn	...								

De acordo com a matriz de cenários (Quadro 9), procede-se à identificação das vulnerabilidades. Numa lista de vulnerabilidades deve constar a descrição do tipo de risco a avaliar para cada componente considerado.

O Quadro 10 apresenta um exemplo de uma lista de vulnerabilidades de um sistema de abastecimento de água.

Quadro 10 - Identificação das vulnerabilidades (Adaptado de Zidko, 2008)

Número	Código	Descrição
1	P1-C1	Total ou parcial destruição das estruturas de captação nas linhas de água
2	P1-C2	Danificação de equipamentos de bombagem e eléctricos
3	P1-C3	Ruptura de condutas expostas ao longo da linha de água
4	P1-C4	Galgamento
5	P2-C2	Deterioração dos elementos decorrente do corte de energia
6	P2-C3	Aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração
7	P2-C4	Deterioração dos elementos devido ao corte de energia
8	P2-C6	Falhas de abastecimento e aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração
9	P2-C7	Falhas de abastecimento e aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração
10	P3-C1	Dependência de abastecimentos de água alternativos – aumento dos custos de operação
11	P3-C6	Falhas de abastecimento e aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração
12	P3-C7	Falhas de abastecimento e aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração
13	P4-C2	Destruição/furtos de elementos das estações elevatórias
14	P5-C5	Destruição/furtos de elementos dos reservatórios
...

O próximo passo é definir a frequência para cada cenário de risco, para a composição da tabela de frequências são usados 6 níveis de frequência para cada cenário considerado. A cada nível de frequência é atribuído uma classificação, um “valor de referência”, e um critério de valoração. Para

aplicação prática da escala deve ter-se presente que o limite inferior de um intervalo de frequência pertence ao intervalo anterior e que em caso de dúvida se deve sempre optar por um nível superior. A tabela de frequência é apresentada no Quadro 11.

Quadro 11 - Tabela de frequências (Acevedo, 2002)

Frequência	Definição	Frequência	Valor
Improvável	Difícil que ocorra	Menos de uma vez em cada 50 anos	1
Remoto	Baixa probabilidade de ocorrência	Uma vez entre 20 e 50 anos	2
Ocasional	Limitada probabilidade de ocorrência	Uma vez entre 5 e 20 anos	3
Moderado	Média probabilidade de ocorrência	Uma vez entre 1 e 5 anos	4
Frequente	Significativa probabilidade de ocorrência	Entre 1 e 10 casos por ano	5
Constante	Alta probabilidade de ocorrência	Mais de 10 casos por ano	6

De seguida, procede-se à definição da tabela de consequências. Esta tabela deve conter um número de níveis ou intervalos suficientes, de forma a ser fiável e de fácil interpretação. Na elaboração destas tabelas atribui-se um valor de referência, cujo único requisito é que à maior consequência seja atribuído o maior valor. Utiliza-se uma escala “semi-geométrica” na atribuição dos valores de referência com o objectivo de atribuir maior peso às consequências do que às frequências.

No Quadro 12 é apresentado um modelo de tabela de consequências:

Quadro 12 - Tabela de Consequências (Acevedo, 2002)

Gravidade	Definição	Valor
Insignificante	Um (1) dia sem serviço contínuo de água em todo o sistema	1
Marginal	Três (3) dias sem serviço contínuo de água em todo o sistema	2
Grave	Dez (10) dias sem serviço contínuo de água em todo o sistema	5
Crítica	Vinte (20) dias sem serviço contínuo de água em todo o sistema	10
Desastrosa	Trinta (30) dias sem serviço contínuo de água em todo o sistema	20
Catastrófica	Mais de trinta (30) dias sem serviço contínuo de água em todo o sistema	50

3.2.3 AVALIAÇÃO DO RISCO

Conforme referido anteriormente (subcapítulo 2.2.1), o risco pode ser determinado pelo produto da Frequência (probabilidade) do evento pela magnitude de suas consequências. Deste modo, a matriz de risco (Quadro 13) é

obtida através do produto da tabela de frequências (Quadro 11) com a tabela das consequências (Quadro 12).

Quadro 13 - Matriz de Risco e Vulnerabilidade (Adaptado de Acevedo, 2002)

Frequência relativa	Constante	6	6 (2,0%)	12 (4,0%)	30 (10,0%)	60 (20,0%)	120 (40,0%)	300 (100,0%)
	Frequente	5	5 (1,7%)	10 (3,3%)	25 (8,3%)	50 (16,7%)	100 (33,3%)	250 (83,3%)
	Moderado	4	4 (1,3%)	8 (2,7%)	20 (6,7%)	40 (13,3%)	80 (26,7%)	200 (66,7%)
	Ocasional	3	3 (1,0%)	6 (2,0%)	15 (5,0%)	30 (10,0%)	60 (20,0%)	150 (50,0%)
	Remoto	2	2 (0,7%)	4 (1,3%)	10 (3,3%)	20 (6,7%)	40 (13,3%)	100 (33,3%)
	Improvável	1	1 (0,3%)	2 (0,7%)	5 (1,7%)	10 (3,3%)	20 (6,7%)	50 (16,7%)
			1	2	5	10	20	50
			Insignificante	Marginal	Grave	Crítica	Desastrosa	Catastrófica
			Consequência relativa					

A matriz (Quadro 13) mostra o valor do risco e vulnerabilidade para cada cenário considerado. O valor da esquerda representa o risco e o valor entre parênteses representa a vulnerabilidade. O valor da vulnerabilidade é dado pela percentagem de risco relativamente ao valor de risco máximo definido, ou seja, o valor máximo teórico do risco é de 300, que resulta do produto da frequência máxima (6) pela consequência máxima (50).

Para determinar os limites de cada uma das zonas de aceitabilidade da matriz, são usados os critérios de aceitabilidade referidos no Quadro 14, em função da vulnerabilidade relativa (Acevedo, 2002).

Quadro 14 - Critérios de aceitabilidade (Acevedo, 2002)

Critério	Intervalo de aceitabilidade
Aceitável	Até 3,0% de vulnerabilidade
Tolerável	Entre 3,1% e 5,0% de vulnerabilidade
Inaceitável	Entre 5,1% e 25% de aceitabilidade
Inadmissível	Mais de 25% de aceitabilidade

Com base nos critérios de aceitabilidade (Quadro 14) e na matriz de risco e vulnerabilidade (Quadro 13), constrói-se a matriz de aceitabilidade de riscos apresentada no Quadro 15.

Quadro 15 - Matriz de aceitabilidade do risco (Acevedo, 2002)

Frequência relativa	Constante	6	Aceitável	Tolerável	Inaceitável	Inaceitável	Inadmissível	Inadmissível
	Frequente	5	Aceitável	Tolerável	Inaceitável	Inaceitável	Inadmissível	Inadmissível
	Moderado	4	Aceitável	Aceitável	Inaceitável	Inaceitável	Inadmissível	Inadmissível
	Ocasional	3	Aceitável	Aceitável	Tolerável	Inaceitável	Inaceitável	Inadmissível
	Remoto	2	Aceitável	Aceitável	Tolerável	Inaceitável	Inaceitável	Inadmissível
	Improvável	1	Aceitável	Aceitável	Aceitável	Tolerável	Inaceitável	Inaceitável
			1	2	5	10	20	50
			Insignificante	Marginal	Grave	Crítica	Desastrosa	Catastrófica
Consequência relativa								

Todos os cenários estabelecidos devem ser associados à matriz de aceitabilidade de riscos, constituindo o conjunto destes resultados o perfil dos riscos do sistema, o qual servirá de base para a gestão do risco.

3.3 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE SISTEMAS EM PRESSÃO

3.3.1 INTRODUÇÃO

No presente subcapítulo é analisado o comportamento hidráulico de sistemas de condutas com escoamento em pressão, definindo o valor da vulnerabilidade com base nos valores assumidos pelas variáveis hidráulicas (pressão e velocidade de escoamento), para cada conduta e para toda a rede. “O valor da vulnerabilidade ou índice de vulnerabilidade permitirá a atribuição do nível de significância ao perigo relativo ao funcionamento do sistema.” (Zidko, 2008).

Tendo por base a metodologia de avaliação do desempenho de sistemas hidráulicos em pressão (subcapítulo 3.1), a metodologia, proposta por Zidko (2008), para a avaliação da vulnerabilidade de um sistema de abastecimento de água é composta por três etapas:

- (i) **definir a curva de vulnerabilidade**, que traça o valor da vulnerabilidade atribuída à variável condicional da rede que neste caso foram consideradas a pressão e a velocidade de escoamento;
- (ii) **aplicar a função de generalização**, que permite calcular valores agregados globais para o sistema;
- (iii) **avaliação do comportamento do sistema** face à caracterização temporal, através de gráficos de simulação dinâmica, que permite avaliar o desempenho do sistema de distribuição de água.

3.3.2 CURVAS DE VULNERABILIDADE

3.3.2.1 Considerações Gerais

A curva de vulnerabilidade é definida segundo a hierarquização de factores associados ao desempenho hidráulico, à fiabilidade do sistema e ao consumo de energia.

O índice de vulnerabilidade, varia entre a vulnerabilidade máxima (100%) e a situação óptima (0%) (Zidko, 2008), em que:

100% - vulnerabilidade máxima;

75% - vulnerabilidade inaceitável;

- 50% - vulnerabilidade minimamente aceitável (limiar da aceitabilidade);
- 25% - vulnerabilidade aceitável;
- 0% - situação óptima.

3.3.2.2 Pressão de Serviço

De acordo com os valores, regulamentados, para a pressão mínima, a pressão máxima e as flutuações de pressão admissíveis nos sistemas de distribuição de água e com a classificação do índice de vulnerabilidade, definido anteriormente, para a curva de vulnerabilidade da pressão (Figura 12 a) a situação óptima (0%) é atribuída à pressão de 30mc.a. e a vulnerabilidade máxima é atribuída às pressões inferiores a 10mc.a..

Com o desvio da situação óptima, as penalizações aumentam com o acréscimo da pressão, tendo sido atribuído um aumento da vulnerabilidade menos acentuada para os primeiros 20mc.a. acima da pressão de 30mc.a.. Deste modo, para a pressão de 50mc.a. é atribuída a vulnerabilidade aceitável (25%), com o aumento da pressão, a pressão de 65mc.a. corresponde à vulnerabilidade inaceitável (75%). Acima deste valor, considera-se que a vulnerabilidade mantém-se inaceitável (75%).

Os valores de vulnerabilidade correspondentes a situações intermédias podem ser obtidos por interpolação linear.

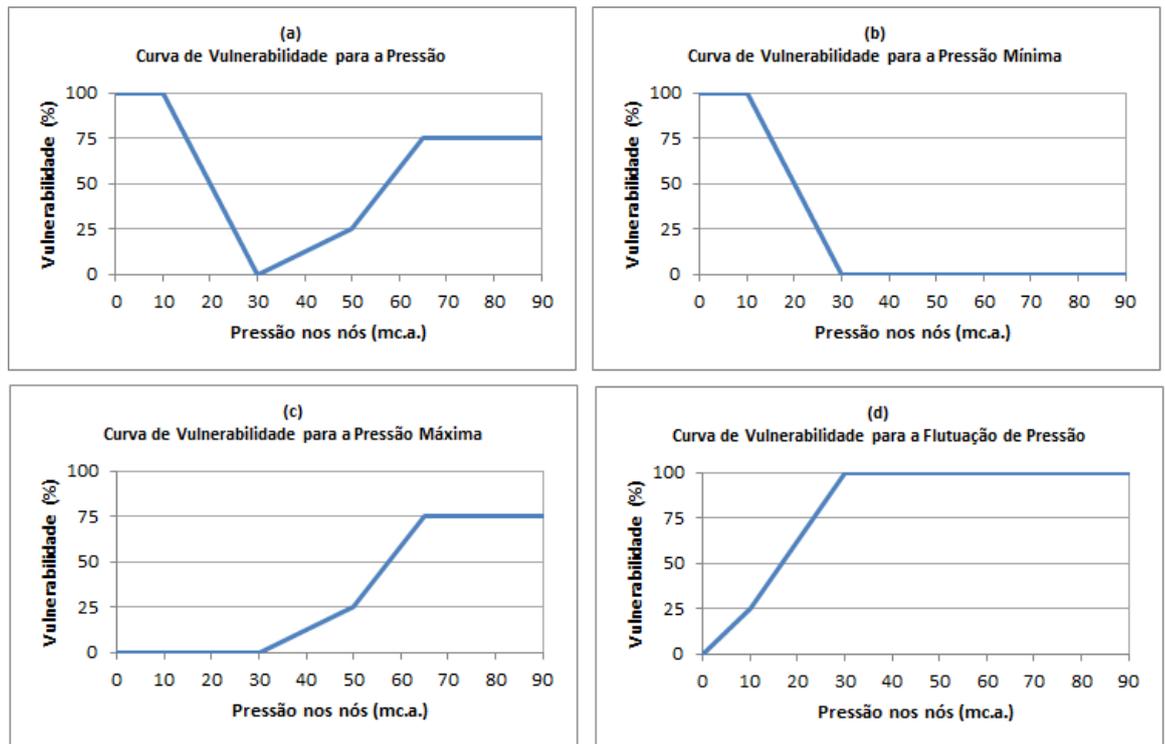


Figura 12 - Curvas de vulnerabilidade para (a) pressão (global), (b) pressão mínima, (c) pressão máxima e (d) flutuação de pressão (Fonte: Zidko, 2008)

O desdobramento da curva de vulnerabilidade de pressões em duas, tal como efectuado para a curva de desempenho, onde se analisam as pressões mínimas (Figura 12 b) e as pressões máximas (Figura 12 c), permite uma análise mais específica, que permite uma identificação mais fácil dos possíveis problemas existentes.

Relativamente, à curva de vulnerabilidade para a flutuação de pressão (Figura 12 d) a situação óptima (vulnerabilidade 0%) corresponde às flutuações de pressão nula, ou seja, a vulnerabilidade óptima corresponde às pressões constantes. Com o aumento das flutuações de pressão, até aos 30m.c.a., a vulnerabilidade aumenta linearmente até à vulnerabilidade máxima (100%). Para valores de flutuações de pressão superiores a 30m.c.a. a vulnerabilidade é máxima.

3.3.2.3 Velocidade de Escoamento

Seguindo a mesma lógica utilizada na definição da curva de desempenho da velocidade de escoamento (subcapítulo 3.1.3.3), a curva de vulnerabilidade referente à velocidade de escoamento (Figura 13 a) é, também, definida pela velocidade de referência, obtida pela expressão 3.2.

A situação ótima (0%) é atribuída à velocidade de referência do respectivo troço de conduta.

Pela mesma razão que não é atribuído o desempenho nulo (0%) nas situações em que a velocidade de escoamento é inferior ao limite mínimo admissível (0,3m/s) (subcapítulo 3.1.3.3), também não é atribuída a vulnerabilidade máxima (100%) nestas situações. Neste sentido, é atribuída a vulnerabilidade aceitável (25%) para a velocidade mínima admissível e no caso de a velocidade ser nula é atribuída a vulnerabilidade inaceitável (75%).

Para as velocidades de escoamento superiores à velocidade de referência, devido aos riscos de danos estruturais das condutas inerentes ao acréscimo de velocidade, a vulnerabilidade aumenta linearmente, correspondendo a vulnerabilidade inaceitável (75%) para a velocidade superior duas vezes à velocidade de referência ($2V_{ref}$). A partir deste valor a vulnerabilidade aumenta até à vulnerabilidade máxima (100%), que corresponde ao triplo da velocidade de referência ($3V_{ref}$). Para velocidades superiores a este valor a vulnerabilidade mantém-se máxima (100%).

Os valores de vulnerabilidade correspondentes a situações intermédias podem se obtidos por interpolação linear.

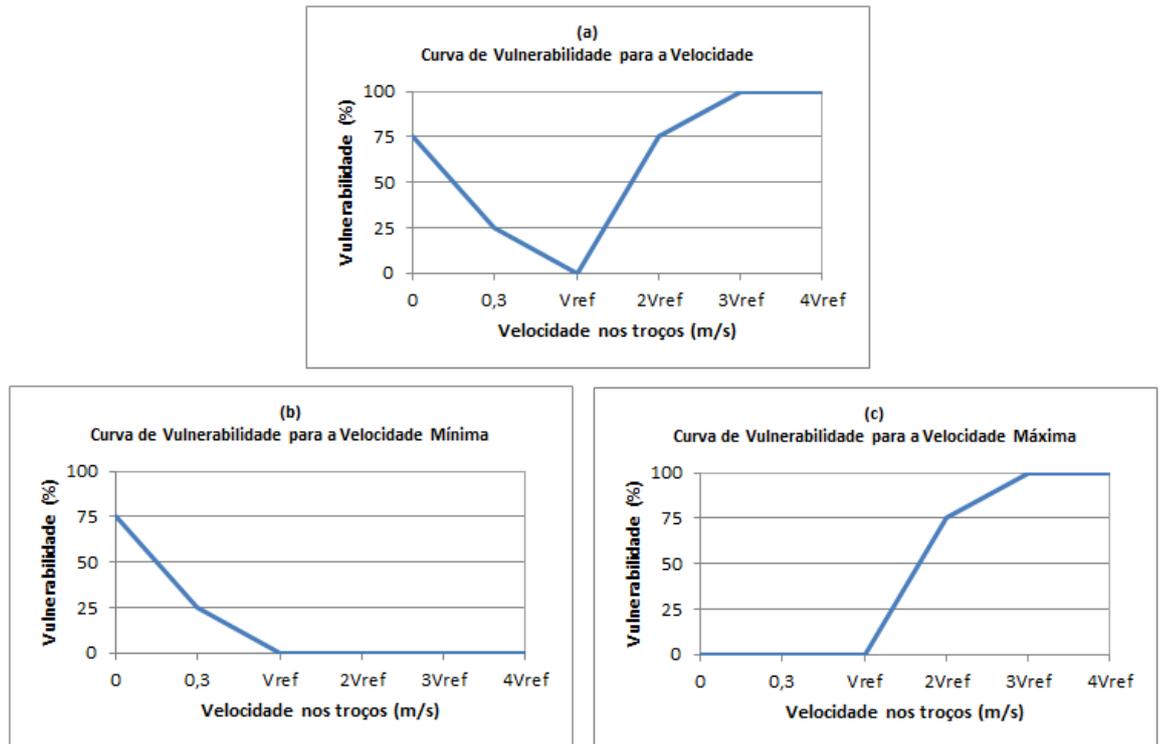


Figura 13 - Curvas de vulnerabilidade para (a) velocidade, (b) velocidade mínima e (c) velocidade máxima (Adaptadas de Zidko, 2008)

O desdobramento da curva de vulnerabilidade da velocidade nas curvas de vulnerabilidade da velocidade mínima (Figura 13 b) e velocidade máxima (Figura 13 c) permite uma análise mais específica, conforme explicado anteriormente.

3.3.3 FUNÇÕES DE GENERALIZAÇÃO

Os valores de vulnerabilidade das variáveis pressão e velocidade são agregados através da expressão 3.7, que representa a importância de cada elemento em relação ao sistema como um todo (Zidko, 2008).

$$V = W(vm_i) = \sum_{i=1}^N (w_i \cdot vm_i) \quad (3.7)$$

sendo: V – valor global da vulnerabilidade;

vm_i – vulnerabilidade em cada elemento i ;

w_i – peso de cada elemento de acordo com a expressão (3.8).

$$w_i = \frac{z_i}{\sum_{i=1}^N z_i} \quad (3.8)$$

sendo: z_i – o elemento utilizado.

Esta função de agregação permite estimar o grau de vulnerabilidade para cada elemento que constitui o sistema, bem como para a globalidade do sistema, em que é atribuído ao elemento utilizado (z_i) a respectiva função da variável em estudo (Zidko, 2008).

Para a variável pressão a função de ponderação, adoptada, corresponde aos consumos nos nós. Deste modo, o elemento utilizado (z_i) corresponde aos consumos no nó e , portanto, a função de agregação (w_i) corresponde à média ponderada dos consumos nodais, cujo peso é dado pela expressão 3.4, definida no subcapítulo 3.1.4.2 do presente trabalho.

No caso da variável velocidade de escoamento, o elemento utilizado (z_i) corresponde ao volume de cada troço, onde se tem em conta o comprimento e diâmetro das condutas. A função de agregação (w_i) corresponde a uma média ponderada em função dos volumes de água dos troços de conduta, cujo peso de cada troço é dado pela expressão 3.6, definida no subcapítulo 3.1.4.3.

3.4 APLICAÇÃO DO MODELO DE HIERARQUIA FUZZY A REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA TOMADA DE DECISÃO DE REABILITAÇÃO

3.4.1 INTRODUÇÃO

A aplicação do Modelo de Hierarquia Fuzzy permite a hierarquização dos componentes de uma rede de distribuição de água em que é necessário intervir em processo de reabilitação. A lógica fuzzy permite obter resultados objectivos a partir da utilização simultânea de variáveis qualitativas e quantitativas, sendo atribuídos pesos e notas aos atributos relacionados com os principais perigos/ameaças e vulnerabilidades dos componentes, bem como ao processo de desempenho do sistema hidráulico.

O Modelo de Hierarquia Fuzzy aplicado no presente estudo tem por base a construção de matrizes que representam, respectivamente, a procura e a oferta relativa a n factores de atributos e m zonas elementares de vulnerabilidade (componentes da rede), ou seja, a possíveis alternativas de localização da ocorrência de uma ruptura ou interrupção do abastecimento de água designadas por áreas a serem hierarquizadas, Zidko (2008).

Na análise de hierarquização dos componentes com prioridade de reabilitação são considerados os principais perigos/ameaças, que poderão causar danos, bem como a vulnerabilidade dos componentes quanto às suas propriedades estruturais, às cargas internas, às cargas externas e à deterioração do material.

As propriedades estruturais de uma conduta condicionam a vulnerabilidade da conduta com as suas características. As características da conduta, nomeadamente o tipo de material, comprimento e diâmetro definem o estado físico da conduta, identificando a natureza de uma possível ruptura ou degradação da conduta (Zidko, 2008).

As cargas internas, devido à pressão de serviço e velocidade de escoamento, são definidas com base na análise de desempenho e de vulnerabilidade do sistema em funcionamento.

Com o tempo verifica-se a diminuição da resistência estrutural das condutas e acessórios, resultando na diminuição da capacidade hidráulica e, em casos de corrosões internas, na degradação da qualidade da água. A resistência estrutural das condutas é afectada pela deterioração do material devido às

circunstâncias ambientais e operacionais, assim como a qualidade da fabricação e da instalação.

3.4.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS E ATRIBUTOS DO MODELO

No presente estudo os atributos do modelo são associados aos seguintes factores de vulnerabilidade da infra-estrutura da conduta: tipo de material (f1), comprimento (f2), diâmetro (f3), pressão de serviço (f4), velocidade de escoamento (f5) e durabilidade do material (f6) Zidko (2008).

A **matriz de procura** é definida pelos seis atributos referidos anteriormente e pelo índice de desempenho da rede quanto ao risco de falha. De acordo com a vulnerabilidade, é atribuído um peso para cada atributo da matriz de procura.

A **matriz de oferta** é definida a partir das notas fornecidas para cada um dos atributos em relação às zonas elementares de vulnerabilidade da conduta. Nos quadros seguintes são apresentadas as notas relativas às características próprias das condutas e acessórios para cada atributo em análise.

Quadro 16 - Notas fornecidas à propriedade estrutural da conduta (Adaptado de Zidko, 2008)

			NOTA	Termos Linguísticos
Propriedade Estrutural da Conduta	Tipo de Material	Polietileno	□	Alta
		Ferro Galvanizado/ PVC	■	Média
		Ferro Dúctil/ Fibrocimento	□	Razoável
		Aço	■	Muito Baixa
	Comprimento (m)	2000 – 4000	□	Alta
		750 – 2000	■	Média
		100 – 750	□	Razoável
		5 – 100	■	Muito Baixa
	Diâmetro (mm)	50 – 80	□	Alta
		80 – 250	■	Média
		250 – 450	□	Razoável
		450 – 800	■	Muito Baixa

Quadro 17 – Notas fornecidas às cargas internas (Adaptada de Zidko, 2008)

Cargas Internas	Escala de Vulnerabilidade		NOTA	Termos Linguísticos
	Variação de Pressão	0,75 – 1	□	Inaceitável
		0,5 – 0,75	■	Minimamente Aceitável
		0,25 – 0,5	□	Aceitável
		0 – 0,25	■	Situação Ótima
	Variação da Velocidade	0,75 – 1	□	Inaceitável
		0,5 – 0,75	■	Minimamente Aceitável
		0,25 – 0,5	□	Aceitável
0 – 0,25		■	Situação Ótima	

Quadro 18 - Notas fornecidas à degradabilidade da conduta (Adaptado de Zidko, 2008)

Degradabilidade da Conduta	Tipo de Material	Idade do Material (anos)	NOTA	Termos Linguísticos
	Polietileno	41 – 50	□	Idade Máxima
		31 – 40	■	Idade Razoável
		21 – 30	□	Idade Média
		0 – 20	■	Idade Mínima
	PVC	38 – 50	□	Idade Máxima
		27 – 38	■	Idade Razoável
		16 – 27	□	Idade Média
		0 – 15	■	Idade Mínima
	Fibrocimento	61 – 70	□	Idade Máxima
		51 – 60	■	Idade Razoável
		41 – 50	□	Idade Média
		0 - 40	■	Idade Mínima
	Ferro Dúctil	88 – 100	□	Idade Máxima
		74 – 87	■	Idade Razoável
		61 – 73	□	Idade Média
		0 – 60	■	Idade Mínima
	Aço	31 – 40	□	Idade Máxima
		21 – 30	■	Idade Razoável
		11 – 20	□	Idade Média
0 – 10		■	Idade Mínima	

	Ferro Fundido	68 – 70	□	Idade Máxima
		44 – 67	■	Idade Razoável
		31 – 43	□	Idade Média
		0 – 30	■	Idade Mínima

A **matriz resultante** é calculada através de um operador matemático fuzzy, com a definição de 4 classes para o índice de desempenho da rede para cada uma das situações de vulnerabilidade verificadas. A importância relativa de cada atributo f é representada por funções de pertinência $\mu(r)$, onde r é o elemento do conjunto R (Nobre, 2006).

De acordo com Zidko (2008) a “defuzzificação” das matrizes de procura e oferta de cada factor definido consiste na transformação em índices adimensionais, compatibilizando os critérios linguísticos aos atributos do problema. Esses índices descrevem objectivamente o grau de desempenho da rede em várias situações de vulnerabilidade.

3.4.3 DEFINIÇÃO DAS MATRIZES

3.4.3.1 Introdução

As matrizes de procura e oferta são do tipo $A = (\mu_{ij})_{h \times n}$ e $B = (\mu_{jk})_{n \times m}$, respectivamente, em que n caracteriza os atributos e m as várias componentes do sistema hidráulico. A variável h é identificada como o parâmetro de desempenho da rede quanto ao risco de uma falha (Zidko, 2008).

Os n atributos são definidos por um conjunto finito $F = \{f_i | i = 1, \dots, n\}$ que é representado por f , em que este conjunto atribui ao parâmetro de desempenho um determinado domínio. A importância relativa do atributo f é representada pela função de pertinência $\mu_{r_{ij}}(r_{ij})$, onde r_{ij} assume um valor na escala real R , correspondendo ao tipo de vulnerabilidade j do domínio analisado. Analogamente, a importância relativa do atributo f_i é uma variável fuzzy, sendo representada pela função de pertinência $\mu_{w_{ij}}(w_{ij})$, onde w_{ij} assume também valores em R . As funções de pertinência assumem valores de $[0,1]$ (Nobre, 2006).

Desta forma, o conjunto fuzzy A' em f é um conjunto de pares ordenados $A' = \{f, \mu_{A'}(f) | f \in F\}$, onde A' é a representação fuzzy da matriz de procura $A = (\mu_{ij})_{h \times n}$ e $\mu_{A'}(f)$ é a função de pertinência que representa o grau de importância dos factores. Da mesma forma, o conjunto fuzzy B' é definido por $B' = \{f, \mu_{B'}(f) | f \in F\}$, onde B' é a representação fuzzy da matriz de oferta $B = (\mu_{jk})_{n \times m}$ e $\mu_{B'}(f)$ é a função de pertinência que representa os níveis de satisfação de cada factor para cada alternativa (Zidko, 2008).

Os elementos das matrizes de procura e oferta possuem quatro categorias de acordo com o grau de importância relativa a cada factor de atributo relativo ao grau de vulnerabilidade da conduta. À semelhança do modelo desenvolvido por Zidko (2008), é adoptada a seguinte convenção do grau de valores para as matrizes de procura e de oferta, respectivamente:

$a_{ij} = \blacksquare, \square, \blacksquare, \square$, se a procura do atributo for crucial, condicionante, pouco condicionante ou irrelevante, respectivamente;

$b_{ij} = \blacksquare, \square, \blacksquare, \square$, se a oferta do atributo da vulnerabilidade j for excelente, boa, razoável ou insatisfatória, respectivamente.

Os elementos da matriz $A = (a_{ij})_{h \times n}$ e $B = (b_{jk})_{n \times m}$ assumem os valores linguísticos referidos anteriormente, de acordo com o comportamento da procura e da oferta. Os valores de $(a_{ij})_{h \times n}$ e $(b_{jk})_{n \times m}$ podem, também, ser expressos segundo os valores numéricos de suas funções de pertinência. As funções de pertinência são calculadas segundo a orientação da Figura 14 (Nobre, 2006).

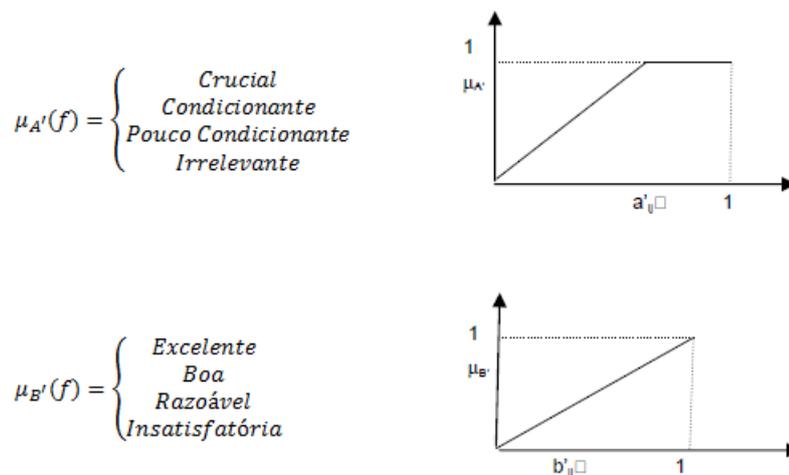


Figura 14 - Funções de pertinência (Adaptado de Nobre, 2006)

3.4.3.2 Matriz de Procura

Tal como proposto por Zidko (2008), na construção da matriz de procura são considerados os seguintes critérios de peso para cada uma das categorias seleccionadas:

- $a_{ij} = \blacksquare$ (crucial) – a procura é intensa pelo atributo em questão, o valor de pertinência é igual a 1;
- $a_{ij} = \square$ (condicionante) – a procura é significativa pelo atributo em questão, o valor de pertinência é igual a 0,8;
- $a_{ij} = \blacksquare$ (pouco significativa) – a procura é pouco influenciada pelo atributo em questão, o valor de pertinência é igual a 0,6;
- $a_{ij} = \square$ (irrelevante) – a procura é praticamente independente do atributo em questão, o valor de pertinência é igual a 0,4.

O Quadro 19 apresenta um exemplo de uma matriz de procura. Esta matriz apresenta seis atributos (tipos de vulnerabilidade) e apenas um índice, que é definido pelo grau de desempenho da rede quanto ao risco da ocorrência de uma falha. Assim, a matriz de procura $A = (a_{ij})_{h \times n}$ é do tipo $A = (a_{ij})_{6 \times 1}$.

apresentada no Capítulo 2, bem como os Quadros 16, 17 e 18, nos quais é apresentada a classificação de vulnerabilidade.

No Quadro 20 é apresentado um exemplo de uma matriz de oferta.

Quadro 20 - Matriz de oferta $B=(b_{jk})_{n \times 6}$

Troço de Conduta	Propriedade Estrutural			Cargas Internas		Degradabilidade
	Diâmetro	Comprimento	Tipo de Material	Pressão	Velocidade	Durabilidade da conduta e acessórios
1	1	1	0,6	0,6	0,8	0,8
2	1	0,8	0,6	0,6	0,8	0,8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	-	-	-	-	-	-

NOTA – Quanto à não vulnerabilidade do material

<input checked="" type="checkbox"/> Excelente	<input checked="" type="checkbox"/> Razoável
<input type="checkbox"/> Boa	<input type="checkbox"/> Insatisfatória

3.4.3.4 Matriz Produto C

A matriz produto $C = (C_{ik})_{h \times n} = A \times B$ representa o resultado das comparações entre a procura e a oferta de cada factor. Esta matriz segue a seguinte regra, conforme o Quadro 21:

Quadro 21 - Operador fuzzy (Nobre, 2006)

$a_{ij} \backslash b_{jk}$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	0	0
<input type="checkbox"/>	$1+1/n$	1	0	0
<input checked="" type="checkbox"/>	$1+2/n$	$1+1/n$	1	0
<input type="checkbox"/>	$1+3/n$	$1+2/n$	$1+1/n$	1

No Quadro 21, o n é igual ao número de factores/atributos considerados na operação. De acordo com Nobre (2006), na operação de matrizes, são estabelecidas as seguintes condições adequadas às operações matemáticas fuzzy:

se $a_{ij} = b_{jk}$, o indicador é igual a 1;

se $a_{ij} > b_{jk}$, o coeficiente fuzzy é igual a 0;

se $a_{ij} < b_{jk}$, o coeficiente fuzzy é maior do que 1.

A matriz de resultados $\Delta = (\delta_{ik})_{n \times m}$, apresenta índices que indicam quais os factores de procura que são atendidos pelas alternativas em estudo. Esta matriz é dada por:

$$\Delta = (\delta_{ik})_{n \times m} / FD \quad (3.9)$$

onde FD é o factor de procura do problema, dado pelo somatório dos valores numéricos das funções de pertinência atribuídos aos elementos da matriz de procura. Estes elementos têm o seguinte significado (Nobre, 2006):

se $\delta_{ik} = 1$, a alternativa k atende a procura no nível pretendido;

se $\delta_{ik} > 1$, a alternativa k oferece mais condições do que as requeridas;

se $\delta_{ik} < 1$, pelo menos um factor requerido não foi atendido adequadamente.

4. CASO DE ESTUDO – SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE CORTE DA VELHA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

A descrição detalhada de todo o sistema de abastecimento de água em estudo é fundamental para uma correcta representação dos elementos no modelo, bem como para um aumento do conhecimento do comportamento da rede e seu controlo operacional, necessários para a simulação do sistema no software EPANET 2.0. Neste sentido apresenta-se, de seguida, uma compilação das principais características do sistema de abastecimento de água em estudo.

A metodologia descrita, anteriormente, é aplicada ao sistema de abastecimento de água da aldeia Corte da Velha, que pertence ao concelho de Mértola e distrito de Beja (Figura 15).

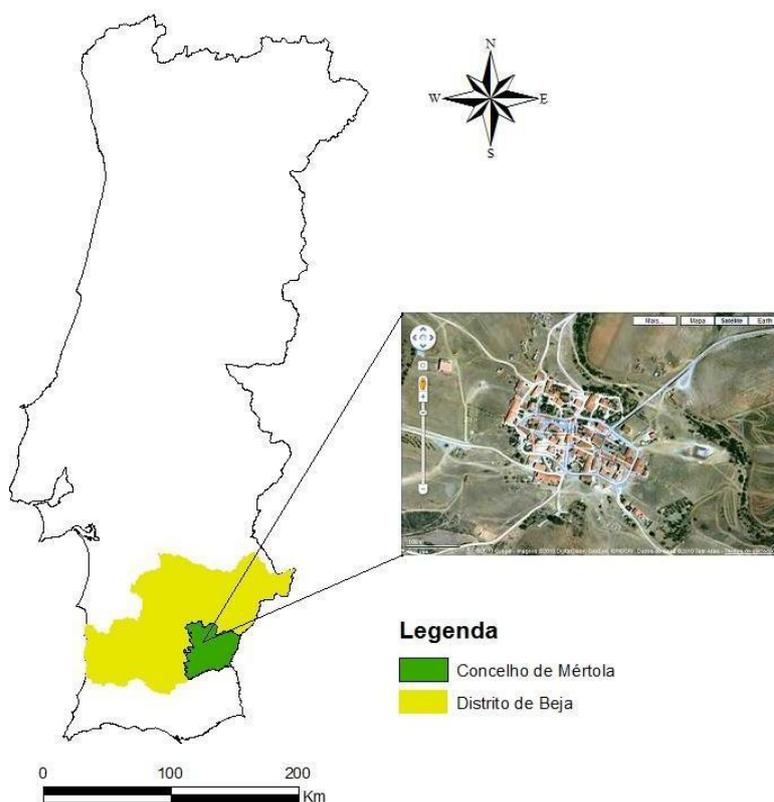


Figura 15 - Localização da aldeia Corte da Velha

O sistema de abastecimento de água da aldeia de Corte da Velha é um sistema relativamente recente, em que o projecto de execução data de 2001, e caracteriza-se por uma ocupação tipicamente residencial, sendo a população, actualmente servida, estimada em cerca de 130 habitantes.

Este sistema de abastecimento de água é constituído por uma origem de água, que é um furo de captação localizado a Oeste da aldeia, um sistema de adução por bombeamento, um reservatório de distribuição e uma rede de distribuição, conforme ilustra a Figura 16.

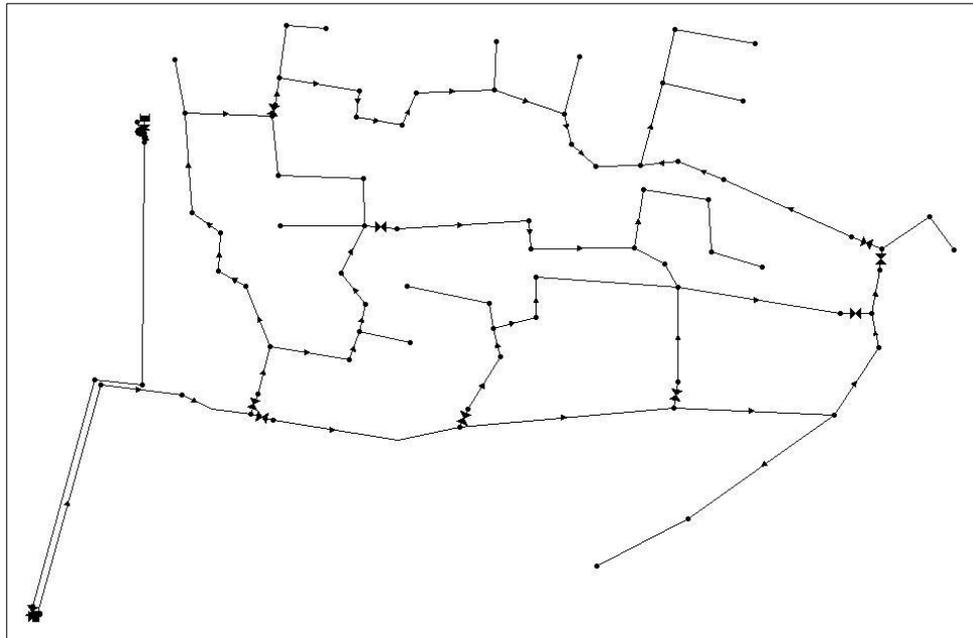


Figura 16 - Esquema do sistema de abastecimento de água da aldeia de Corte da Velha

Na Figura 17 representa-se a topografia do terreno na região de implantação do sistema de abastecimento de água. O reservatório de distribuição encontra-se à cota 162m.

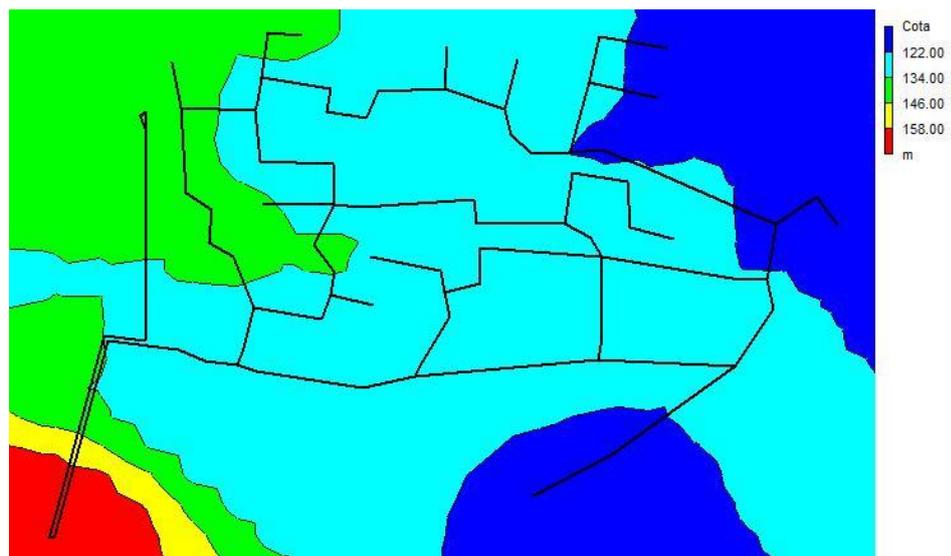


Figura 17 - Topografia do terreno (EPANET 2.0)

Apresenta-se no Quadro 22 os dados estatísticos relativos às cotas topográficas do sistema de abastecimento de água, permitindo de uma forma geral analisar as características topográficas do local em estudo.

Quadro 22 - Dados estatísticos das cotas topográficas nos nós

Dados estatísticos dos nós	Cota topográfica (m)
Cota topográfica máxima	165.3
Cota topográfica mínima	117.7
Cota topográfica média	129.7
Desvio padrão	8.5

Todas as condutas do sistema de abastecimento de água em estudo são em Polietileno de Alta Densidade (PEAD).

O comprimento e diâmetro das condutas são aspectos que permitem analisar a estrutura base do sistema de abastecimento de água, conforme se apresenta na Figura 18 e na Figura 19.

Foram atribuídos os valores de pertinência, referentes ao diâmetro e comprimento de cada trecho do sistema, os valores apresentados nas legendas das Figuras 17 e 18, correspondentes à classificação apresentada no Quadro 16.

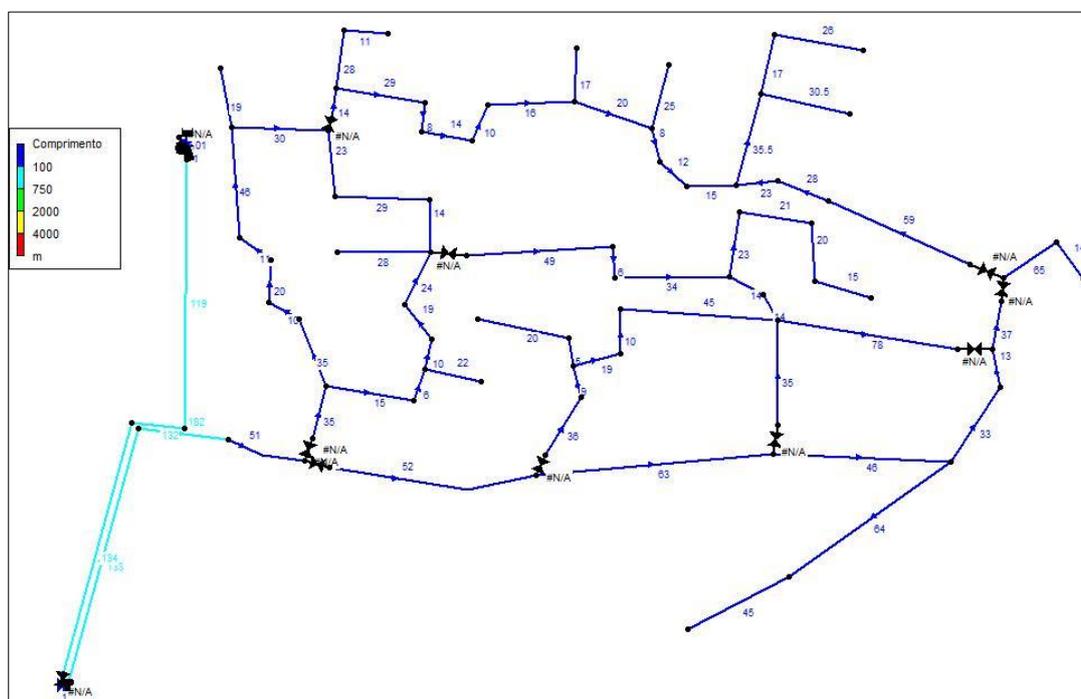


Figura 18 - Classes de comprimento das condutas (EPANET 2.0)

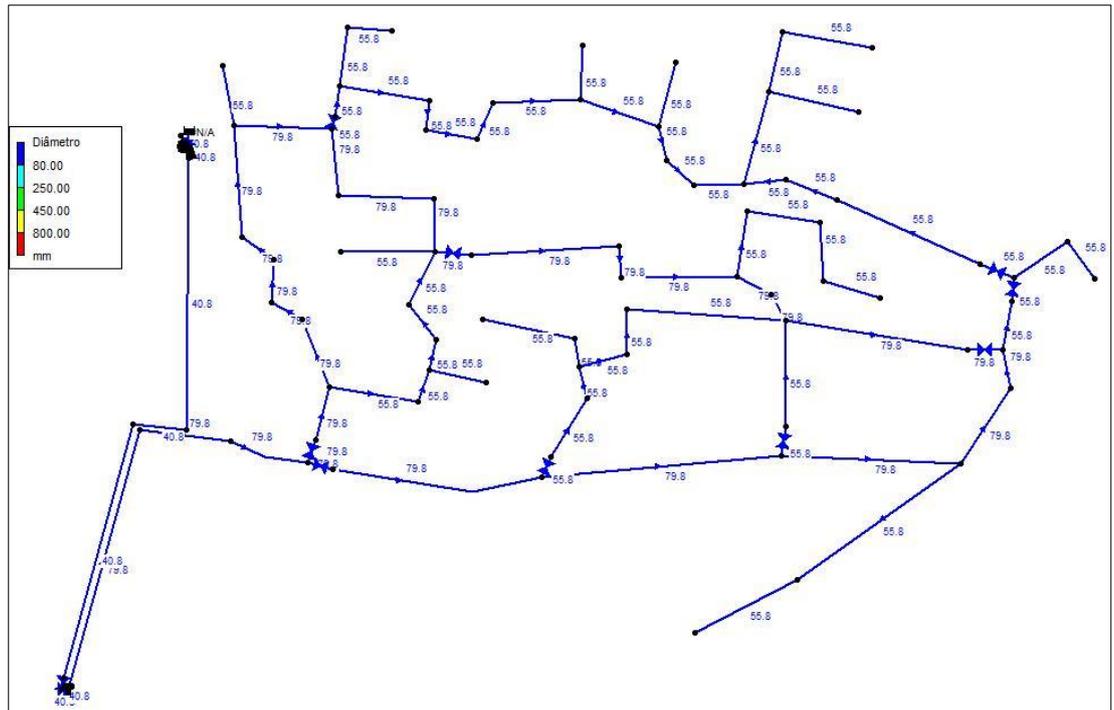


Figura 19 – Classes de diâmetro das condutas (EPANET 2.0)

A topografia do terreno, o comprimento e diâmetro das condutas são características físicas do sistema de abastecimento de água e, por isso, estáticas ao longo do período de simulação (24 horas).

A simulação do sistema de abastecimento de água, pela aplicação do software EPANET 2.0, requer mais alguns parâmetros, sendo um deles o padrão temporal da variação periódica dos consumos nos nós ao longo do tempo.

No presente caso de estudo adoptou-se um padrão temporal de consumos de Sá Marques e Sousa (2008) para um factor de ponta instantâneo igual a 4, correspondente a um aglomerado com um número reduzido de habitantes servidos pelo sistema de abastecimento de água de Corte da Velha (Figura 20).

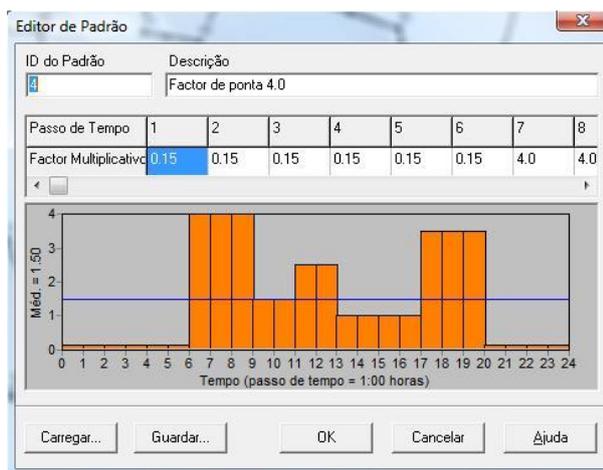


Figura 20 - Padrão temporal de consumos (EPANET 2.0)

De acordo com o projecto de execução do sistema de abastecimento de água em estudo, o grupo electrobomba submersível, na obra de captação, satisfaz as seguintes condições de funcionamento:

- altura manométrica máxima – 80mc.a.;
- caudal correspondente – 0,3 l/s.

O que permite criar a curva característica da bomba apresentada na Figura 21.

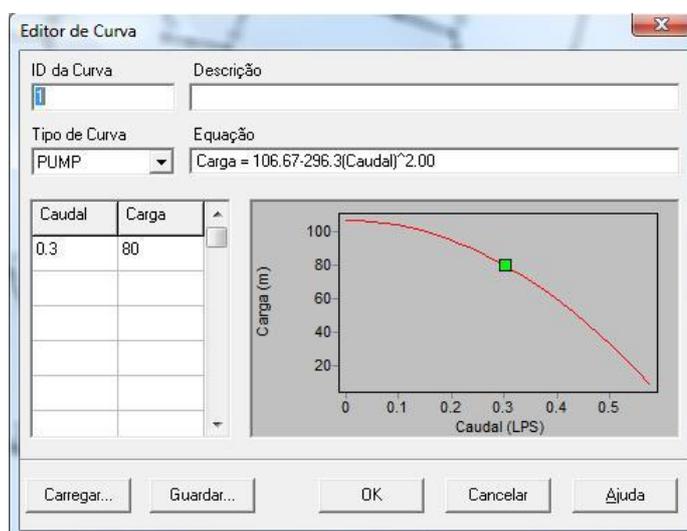


Figura 21 - Curva característica da bomba (EPANET 2.0)

De forma a controlar a altura de água no reservatório de distribuição e o tempo de funcionamento do grupo electrobomba são definidos controlos com condições múltiplas (Figura 22). Estes controlos definem o estado de funcionamento do grupo electrobomba, em função da altura de água no reservatório de distribuição.

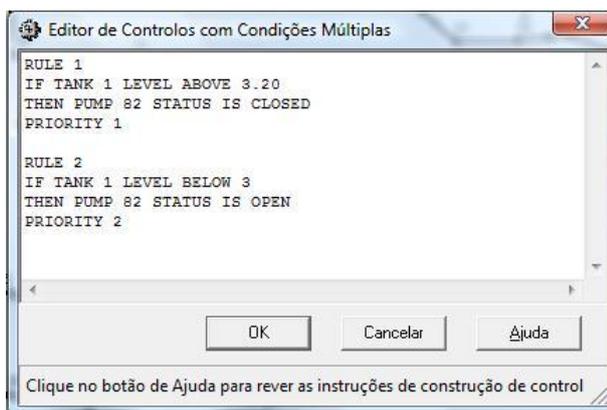


Figura 22 - Controlos com condições múltiplas para o funcionamento da bomba na estação elevatória (EPANET 2.0)

De referir que o grupo electrobomba entra em funcionamento quando o nível de água no reservatório de distribuição é de 3 metros, uma vez que o caudal bombeado pelo grupo electrobomba é de apenas 0,3 l/s. Por outro lado, o grupo electrobomba é desligado quando o nível de água no reservatório de distribuição é máximo (3,20 m).

Depois de definidos todos os parâmetros descritos anteriormente, é possível correr o software Epanet 2.0 em simulação dinâmica, por um período de 24 horas, para condições de regime quase-permanente. Os resultados obtidos podem ser expressos em gráficos (Figura 23) ou em tabelas.

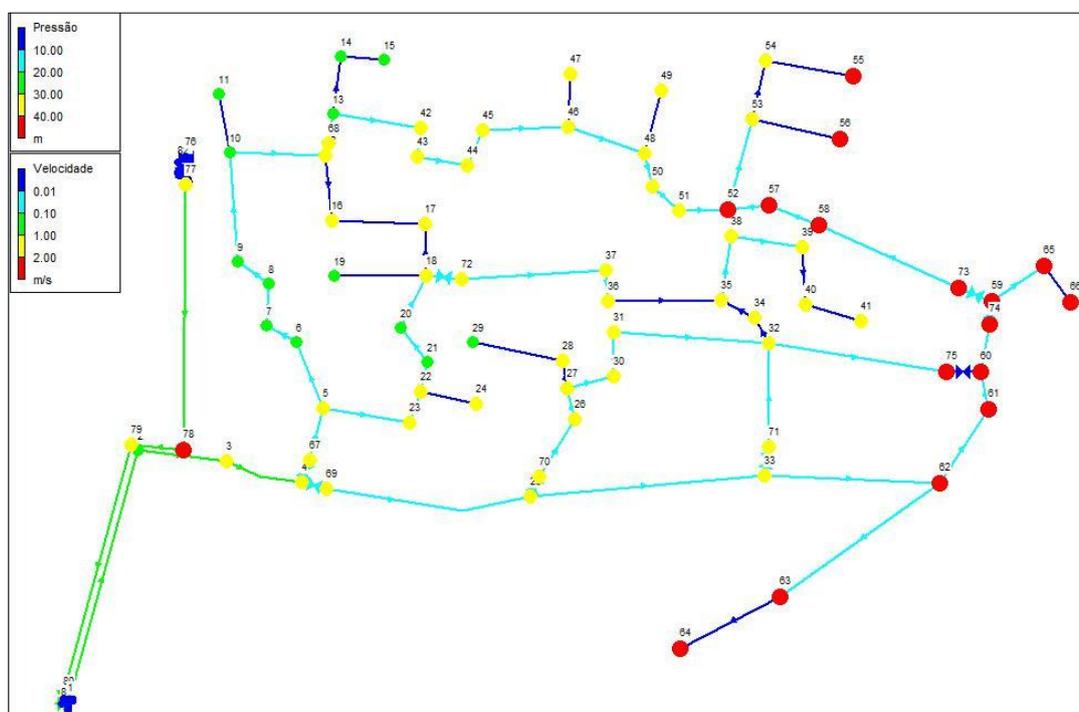


Figura 23 - Pressão nos nós e velocidade nos troços às 13 horas (EPANET 2.0).

4.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

4.2.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

A avaliação do desempenho hidráulico do sistema de abastecimento de água de Corte da Velha é efectuada com base na análise dos valores de pressão e de velocidade de escoamento, obtidos na simulação dinâmica, descrita anteriormente.

O desempenho é representado através de diagramas de simulação dinâmica, que permitem avaliar o desempenho do sistema de abastecimento de água de Corte de Velha.

Os diagramas de simulação dinâmica são formados por bandas de percentil de 25%, que devem ser lido do seguinte modo: se (x,y) são coordenadas de um determinado ponto na curva de percentil P%, significa que, em condições de regime quase-permanente para um instante de tempo x, a percentagem de água distribuída com um desempenho igual ou inferior a y é P%.

A metodologia para a avaliação do desempenho relativamente à variável pressão é composta pelos seguintes pontos:

- 1) Organizar os valores de pressão e consumo por nós e para cada intervalo de tempo (1 hora);

Quadro 23 - Pressões e consumos por nós, para cada intervalo de tempo

Nós	Intervalo de tempo 1 - 00:00h		...	Intervalo de tempo 25 - 24:00h	
	Consumo (l/s)	Pressão (m)		Consumo (l/s)	Pressão (m)
2	0.00	29.54	...	0.00	27.26
3	0.00	38.48	...	0.00	36.20
4	0.00	37.89	...	0.00	35.61
...
...
75	0.00	43.15	...	0.00	40.88

- 2) Determinar, com base nas curvas de penalidade (Figura 10 a), o valor do desempenho para cada nó e para cada intervalo de tempo;

Quadro 24 - Valores de desempenho

Nós	Intervalo de tempo 1 - 00:00h			...	Intervalo de tempo 25 - 24:00h		
	Consumo (l/s)	Pressão (m)	Desempenho (%)		Consumo (l/s)	Pressão (m)	Desempenho (%)
2	0.00	29.54	97.70	...	0.00	27.26	86.30
3	0.00	38.48	89.40	...	0.00	36.20	92.25
4	0.00	37.89	90.14	...	0.00	35.61	92.99
...
...
75	0.00	43.15	83.56	...	0.00	40.88	86.40

3) Ordenar os valores por ordem crescente de desempenho;

Quadro 25 - Valores ordenados por ordem crescente de desempenho (00:00h)

Nós	Intervalo de tempo 1 - 00:00h		
	Consumo (l/s)	Pressão (m)	Desempenho (%)
66	0.00	47.48	78.15
65	0.00	47.10	78.63
55	0.00	46.04	79.95
...
...
14	0.00	30.14	99.83

Quadro 26 - Valores ordenados por ordem crescente de desempenho (24:00h)

Nós	Intervalo de tempo 25 - 24:00h		
	Consumo (l/s)	Pressão (m)	Desempenho (%)
11	0.00	24.13	70.65
10	0.00	24.91	74.55
9	0.00	25.33	76.65
...
...
22	0.00	30.42	99.48

4) Calcular o consumo acumulado (percentagem do consumo total que ocorre no sistema durante as 24 horas);

Quadro 27 - Consumo acumulado (00:00h)

Nós	Intervalo de tempo 1 - 00:00h			
	Consumo (l/s)	Pressão (m)	Desempenho (%)	Consumo Acumulado (%)
66	0.00	47.48	78.15	0
65	0.00	47.10	78.63	0
55	0.00	46.04	79.95	0
...
...
14	0.00	30.14	99.83	100

Quadro 28 - Consumo acumulado (24:00h)

Nós	Intervalo de tempo 25 - 24:00h			
	Consumo (l/s)	Pressão (m)	Desempenho (%)	Consumo Acumulado (%)
11	0.00	24.13	70.65	0
10	0.00	24.91	74.55	0
9	0.00	25.33	76.65	0
...
...
22	0.00	30.42	99.48	100

De referir que é com base no consumo acumulado que são determinados os limites para as bandas de percentil dos diagramas de simulação dinâmica.

5) Construir os diagramas de simulação dinâmica;

Os diagramas de simulação dinâmica são definidos com base nos valores do desempenho que correspondem aos limites do consumo acumulado. Neste sentido, para cada intervalo de tempo obtêm-se 4 valores de desempenho de consumo que definem os seguintes limites:

- 100% do consumo deu-se com desempenho inferior a x_1 ;
- 75% do consumo deu-se com desempenho inferior a x_2 ;
- 50% do consumo deu-se com desempenho inferior a x_3 ;
- 25% do consumo deu-se com desempenho inferior a x_4 ;

Sendo x_1 , x_2 , x_3 e x_4 constantes.

Deste modo, o diagrama de simulação dinâmica é composto por 4 áreas que correspondem a bandas de percentil de 25%.

Na Figura 24 apresenta-se o diagrama de simulação dinâmica para o desempenho da pressão, ponderada com o consumo nos nós, ao longo das 24 horas.

Da análise deste diagrama, verifica-se que o desempenho médio desenvolve-se em torno do nível 90%, o que corresponde a um nível de desempenho entre o serviço adequado (75%) e o serviço óptimo (100%). Verifica-se, também, que para os consumos baixos (banda relativa à área de 0 a 25%) o desempenho varia de 0% a 88%, isto é devido a alguns nós apresentarem baixos desempenhos.

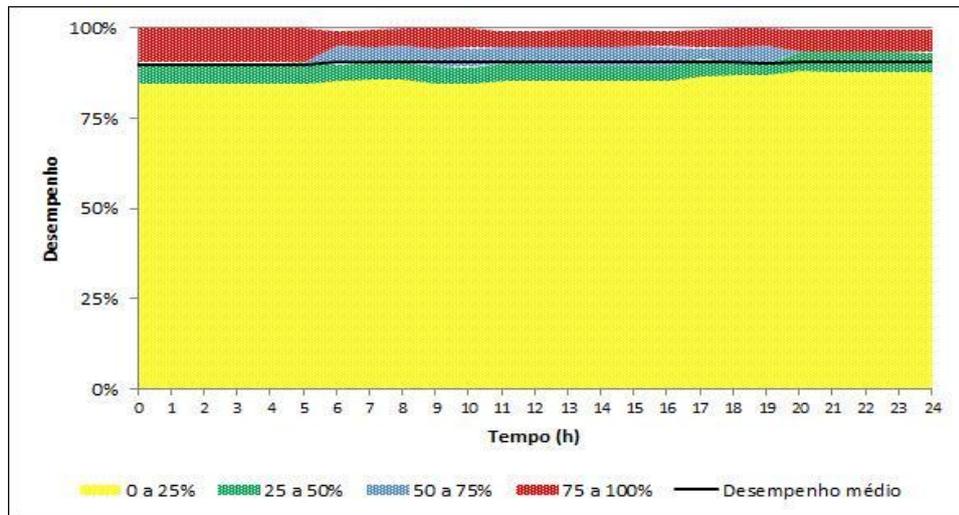


Figura 24 - Diagrama de simulação dinâmica do desempenho da pressão

A análise isolada deste diagrama não permite identificar se o desempenho, que varia de 0% a 88%, é devido às pressões mínimas ou máximas. Neste sentido, repetindo a metodologia descrita, em que a única alteração é na determinação dos valores de desempenho de acordo com as curvas de penalidade para a pressão mínima e para a pressão máxima (Figura 10), obtêm-se os diagramas de simulação dinâmica para a pressão mínima (Figura 25) e para a pressão máxima (Figura 26), os quais permitem uma análise independente do desempenho.

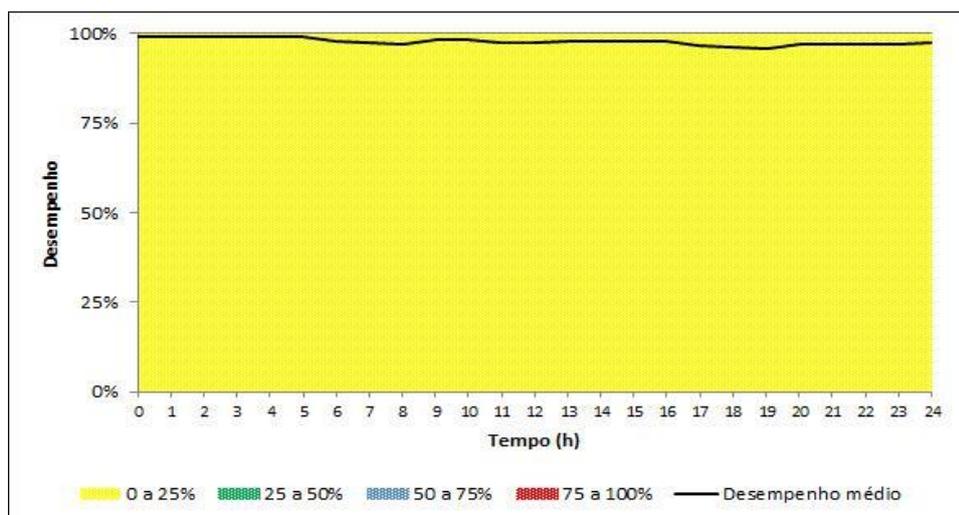


Figura 25 - Diagrama de simulação dinâmica do desempenho da pressão mínima

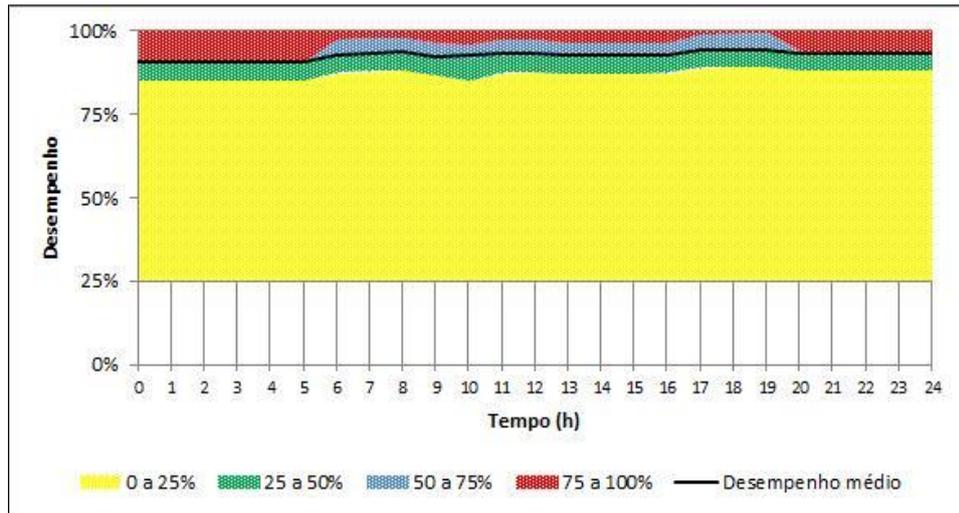


Figura 26 - Diagrama de simulação dinâmica do desempenho da pressão máxima

A análise efectuada aos dois diagramas permite concluir que o desempenho médio para as pressões mínimas (Figura 25) é mais elevado (desenvolve-se em torno do nível de 98%) do que o desempenho médio para as pressões máximas (Figura 26), em que se desenvolve em torno do nível de 93%, podendo, assim, concluir-se que a rede funciona com o desempenho óptimo das pressões (100%). Podendo, concluir-se, também, que a rede de distribuição do sistema em estudo funciona com uma pressão em torno dos 30mc.a..

Relativamente ao diagrama de simulação dinâmica para a flutuação de pressão (Figura 27) é obtido através da metodologia descrita, apenas com a devida adaptação na determinação dos valores de desempenho.

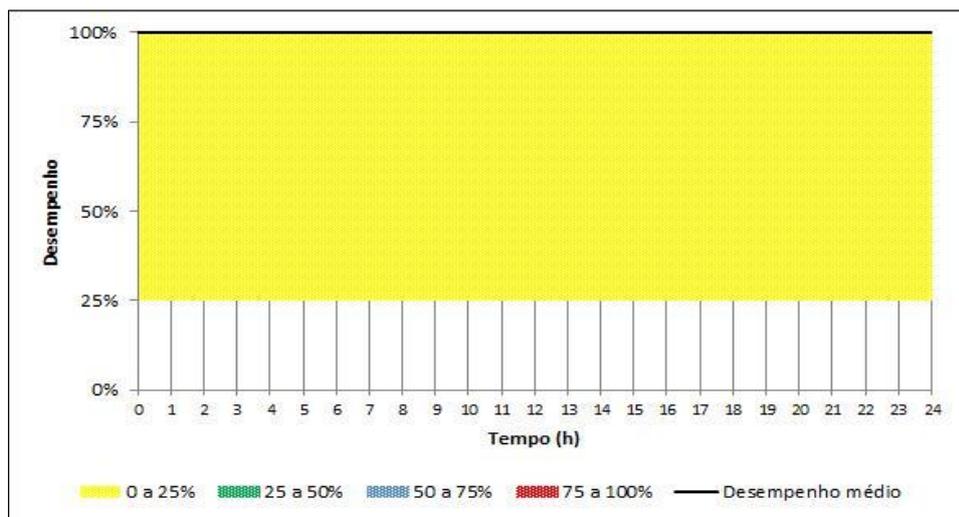


Figura 27 - Diagrama de simulação dinâmica do desempenho da flutuação de pressão

Como se pode verificar as flutuações de pressão são praticamente nulas, ou seja, em condições de regime quase-permanente não há grandes incidentes que poderiam provocar flutuações de pressão. O desempenho médio desenvolve-se em torno do nível de 100%, o que significa que em termos de flutuações de pressão, em regime quase-permanente, o desempenho é ótimo, deste modo, pode-se concluir que as flutuações de pressão são inferiores a 10mc.a..

6) Determinar o desempenho global do sistema;

O desempenho global do sistema, quanto à variável pressão, é determinado através da função de generalização referida no subcapítulo 3.1.4.2.

$$P_p = \sum_{i=1}^N (w_{pi} \times pm_{pi}) = 89,65\%$$

Deste modo, o sistema de abastecimento de água de Corte da Velha tem um desempenho global, relativamente à variável pressão, de cerca de 90%, o que significa que tem um desempenho entre o adequado (75%) e o ótimo (100%).

Relativamente à variável velocidade de escoamento, a metodologia de avaliação do desempenho do sistema é a descrita anteriormente para a variável pressão. No entanto, a função de ponderação não é o consumo, mas sim o caudal nos troços da conduta e as curvas de penalidade, para determinar o desempenho, são as apresentadas na Figura 11. O diagrama de simulação dinâmica para a velocidade de escoamento é apresentado na Figura 28.

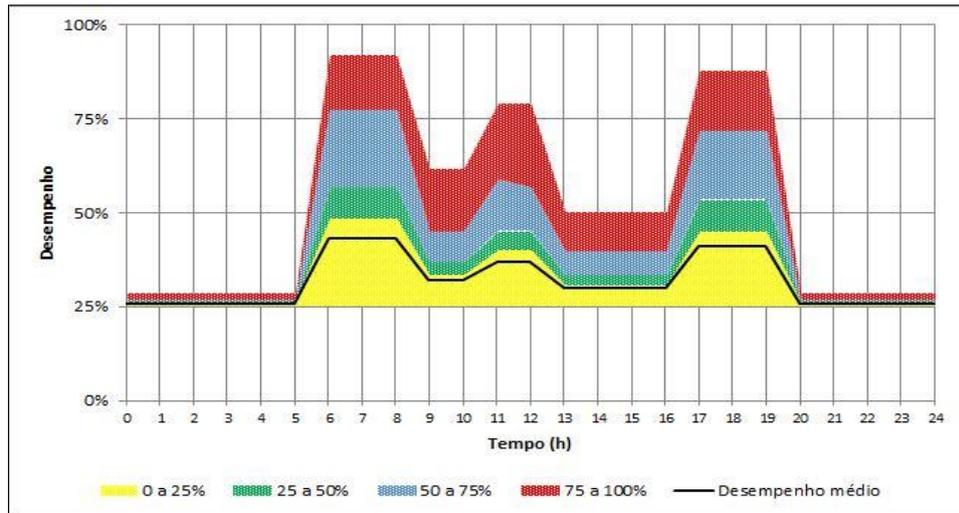


Figura 28 - Diagrama de simulação dinâmica do desempenho da velocidade

Da análise deste diagrama, verifica-se que o desempenho médio se desenvolve entre os 26% e os 43%, ou seja, corresponde a um desempenho entre o serviço inaceitável (25%) e o serviço minimamente aceitável (50%).

Relembrando que o sistema de abastecimento em estudo é de uma pequena aldeia, em que nas primeiras horas (das 0h às 5h) e nas últimas horas (das 20h às 24h), do período de simulação, os consumos são praticamente inexistentes, ou seja, as velocidades de escoamento são muito baixas, verificando-se nestes períodos um desempenho inaceitável (25%). Nas horas intermédias (das 5h às 20h) a velocidade de escoamento aumenta um pouco, devido ao aumento dos consumos, e o desempenho médio sobe um pouco, no entanto, não chega ao nível do minimamente aceitável (50%).

Da análise independente dos desempenhos relativos à velocidade mínima (Figura 29) e máxima (Figura 30), verifica-se que o diagrama de simulação dinâmica para a velocidade mínima é igual ao diagrama da Figura 28, o que é explicado pelo facto de as velocidades de escoamento serem sempre inferiores à velocidade de referência.

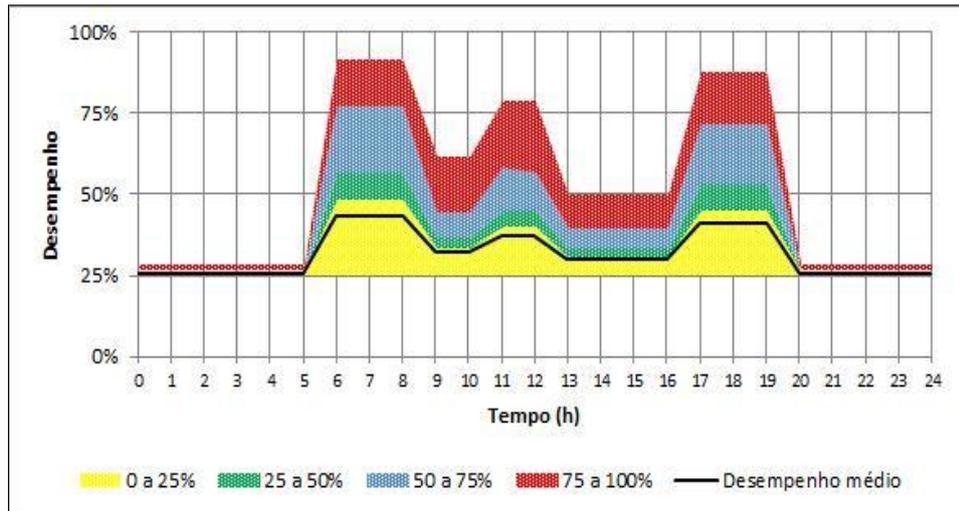


Figura 29 - Diagrama de simulação dinâmica do desempenho da velocidade mínima

Analisando o diagrama de simulação dinâmica para a velocidade máxima (Figura 30) verifica-se que o desempenho médio é óptimo (100%).

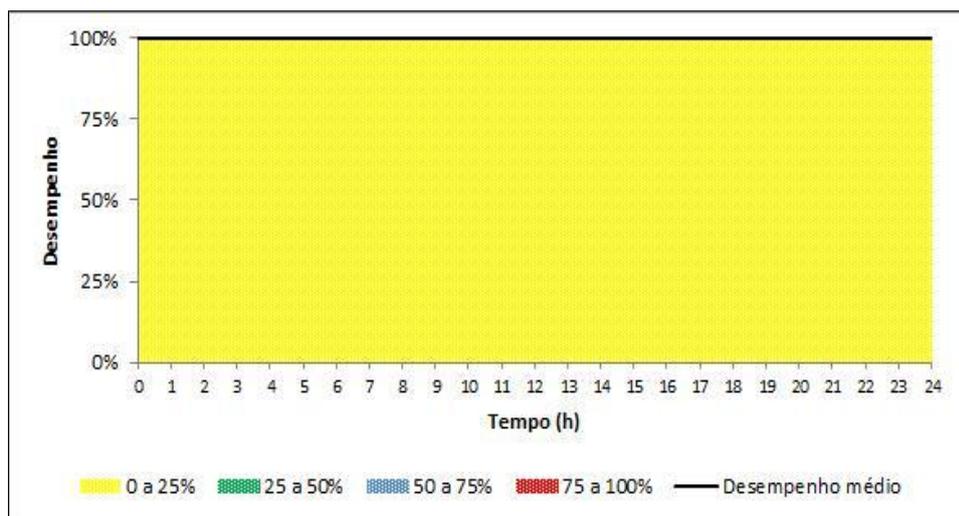


Figura 30 - Diagrama de simulação dinâmica do desempenho da velocidade máxima

Assim, o desempenho inaceitável obtido no diagrama de simulação dinâmica para a velocidade (Figura 28) é devido às velocidades mínimas.

O desempenho global do sistema, quanto à variável velocidade de escoamento, é determinado através da função de generalização referida no subcapítulo 3.1.4.3.

$$P_V = \sum_{i=1}^{NL} (w_{vi} \times pm_{vi}) = 36,27\%$$

Deste modo, o sistema de abastecimento de água de Corte da Velha tem um desempenho global, relativamente à variável velocidade de escoamento, de cerca de 36%, o que significa que tem um desempenho entre o serviço inaceitável (25%) e o serviço minimamente aceitável (50%).

4.2.2 CARACTERIZAÇÃO DO RISCO

A caracterização do risco do sistema de abastecimento de água de Corte da Velha consiste na identificação, análise e avaliação do risco. Para tal, é seguida a metodologia apresentada no subcapítulo 3.2.

4.2.2.1 Identificação do Risco

No Quadro 29 é apresentada a lista de perigos/ameaças passíveis de ocorrerem no sistema de abastecimento de água de Corte da Velha.

Quadro 29 - Lista de perigos/ameaças passíveis de ocorrerem no sistema em estudo

Código	Perigo/Ameaça
P1	Falha de energia
P2	Falta de água
P3	Sismo
P4	Vandalismo
P5	Contaminação de aquíferos

4.2.2.2 Análise do Risco

O primeiro passo da análise de risco é a atribuição de níveis de significância a cada perigo/ameaça listado (Quadro 29), de acordo com a matriz de significância (Quadro 6).

Quadro 30 - Nível de significância dos perigos do sistema em estudo

Código	Perigo/Ameaça	Nível de Significância
P1	Falha de energia	3
P2	Falta de água	6
P3	Sismo	1
P4	Vandalismo	2
P5	Contaminação de aquíferos	1

De seguida, apenas serão considerados os perigos que, de acordo com o Quadro 7, se classifiquem em significativos e muito significativos, ou seja, com o nível de significância superior a 2. Neste sentido, serão considerados os perigos de falha de energia e falta de água.

De seguida, no Quadro 31, são identificadas as componentes do sistema em estudo que possam estar expostas aos perigos/ameaças considerados;

Quadro 31 - Componentes do sistema expostas aos perigos/ameaças

Código	Componentes
C1	Estação elevatória
C2	Adutores
C3	Rede pública - Conduitas e acessórios
C4	Ramais de Ligação
C5	Redes Interiores

Tendo por base os perigos/ameaças considerados (falha de energia e falta de água) e as componentes expostas a estes perigos/ameaças (Quadro 31) procede-se à definição dos cenários de risco (Quadro 32).

Quadro 32 – Matriz de cenários

		Componentes expostas				
		C1	C2	C3	C4	C5
Código	Perigo	Estação Elevatória	Adutores	Rede pública	Ramais Ligação	Redes Interiores
P1	Falha energia	P1-C1	P1-C2	P1-C3	P1-C4	P1-C5
P2	Falta água	P2-C1	-	P2-C3	P2-C4	P2-C5

Posteriormente, procede-se à elaboração de uma lista de vulnerabilidade, onde consta a descrição do tipo de risco a avaliar para cada componente considerada.

Quadro 33 - Lista de vulnerabilidades do sistema em estudo

Código	Descrição
P1-C1	Deterioração dos elementos decorrente do corte de energia
P1-C2	Aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração
P1-C3	Falhas de abastecimento e aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração
P1-C4	Falhas de abastecimento e aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração
P1-C5	Falhas de abastecimento e aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração
P2-C1	Dependência de abastecimentos de água alternativos - aumento dos custos de operação
P2-C3	Falhas de abastecimento e aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração
P2-C4	Falhas de abastecimento e aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração
P2-C5	Falhas de abastecimento e aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração

Definidos os cenários de risco, o próximo passo é definir a frequência com que poderão ocorrer, tendo por base o Quadro 11, considerou-se para todos os cenários uma frequência de uma vez de 1 a 5 anos (Quadro 34)

Quadro 34 - Tabela de frequências para os cenários

Código	Descrição	Frequência	Valor
P1-C1	Deterioração dos elementos decorrente do corte de energia	Uma vez entre 1 e 5 anos	4
P1-C2	Aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração	Uma vez entre 1 e 5 anos	4
P1-C3	Falhas de abastecimento e aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração	Uma vez entre 1 e 5 anos	4
P1-C4	Falhas de abastecimento e aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração	Uma vez entre 1 e 5 anos	4
P1-C5	Falhas de abastecimento e aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração	Uma vez entre 1 e 5 anos	4
P2-C1	Dependência de abastecimentos de água alternativos - aumento dos custos de operação	Uma vez entre 1 e 5 anos	4
P2-C3	Falhas de abastecimento e aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração	Uma vez entre 1 e 5 anos	4
P2-C4	Falhas de abastecimento e aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração	Uma vez entre 1 e 5 anos	4
P2-C5	Falhas de abastecimento e aumento da fadiga do material e sua gradual deterioração	Uma vez entre 1 e 5 anos	4

Por fim, na análise do risco, são definidas as consequências, de acordo com o Quadro 12 considerou-se para a falha de energia e a falta de água, respectivamente, uma gravidade de insignificante e marginal (Quadro 35).

Quadro 35 - Tabela de consequências para os perigos considerados

Código	Perigo	Gravidade	Definição	Valor
P1	Falha de energia	Insignificante	Um (1) dia sem serviço contínuo de água em todo o sistema	1
P2	Falta de água	Marginal	Três (3) dias sem serviço contínuo de água em todo o sistema	2

4.2.2.3 Avaliação do Risco

A avaliação do risco é determinada com base na matriz de risco (Quadro 13), onde são considerados os valores atribuídos às frequências (Quadro 34) e às consequências (Quadro 35) de cada cenário.

Quadro 36 - Resultados para o risco e vulnerabilidade

Código	Risco	Vulnerabilidade
P1-C1	4	1,3%
P1-C2	4	1,3%
P1-C3	4	1,3%
P1-C4	4	1,3%
P1-C5	4	1,3%
P2-C1	8	2,7%
P2-C3	8	2,7%
P2-C4	8	2,7%
P2-C5	8	2,7%

Por fim, cada cenário é associado à matriz de aceitabilidade de riscos (Quadro 15), constituindo o conjunto destes resultados no perfil dos riscos do sistema, o qual servirá de base para a gestão do risco. Deste modo, para o sistema de abastecimento em estudo, obtêm-se os seguintes resultados de aceitabilidade.

Quadro 37 - Resultados de aceitabilidade

Código	Risco	Vulnerabilidade	Resultado de aceitabilidade
P1-C1	4	1,3%	Aceitável
P1-C2	4	1,3%	Aceitável
P1-C3	4	1,3%	Aceitável
P1-C4	4	1,3%	Aceitável
P1-C5	4	1,3%	Aceitável
P2-C1	8	2,7%	Aceitável
P2-C3	8	2,7%	Aceitável
P2-C4	8	2,7%	Aceitável
P2-C5	8	2,7%	Aceitável

Assim, para os cenários considerados (falha de energia e falta de água), pode-se concluir que tanto para o risco como para a vulnerabilidade o sistema apresenta resultados aceitáveis.

4.2.3 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA AO AGLOMERADO CORTE DA VELHA

A metodologia para a avaliação da vulnerabilidade do sistema face à caracterização temporal é semelhante à metodologia utilizada para a avaliação do desempenho do sistema (subcapítulo 4.2.1). A vulnerabilidade é representada através de diagramas de simulação dinâmica, que permitem avaliar a vulnerabilidade do sistema de abastecimento de água de Corte da Velha.

Estes diagramas de simulação dinâmica representam a vulnerabilidade, ao longo do período de simulação (24 horas), relativamente a uma variável (pressão ou velocidade de escoamento), onde se visualizam as áreas sombreadas correspondentes a bandas de percentil de 25% que devem ser interpretadas, à semelhança dos diagramas da avaliação do desempenho, do seguinte modo: se (x,y) são coordenadas de um determinado ponto na curva de percentil de $V\%$, significa que, em condições de regime quase-permanente para o instante t , a percentagem de água distribuída com uma vulnerabilidade igual ou inferior a y é $V\%$.

Como referido anteriormente, a metodologia para a avaliação da vulnerabilidade é semelhante à metodologia para a avaliação do desempenho, em que a única diferença é na determinação da vulnerabilidade, que é obtida através das curvas de vulnerabilidade, nomeadamente, as curvas apresentadas na Figura 12 (curvas de vulnerabilidade para a variável pressão) e na Figura 13 (curvas de vulnerabilidade para a variável velocidade).

Assim, ao aplicar a metodologia para a avaliação do desempenho adaptada à avaliação da vulnerabilidade da pressão, obtêm-se os seguintes resultados:

A Figura 31 apresenta o diagrama de simulação dinâmica da vulnerabilidade da pressão, ao longo de 24 horas. Este diagrama apresenta uma vulnerabilidade média de cerca de 10%, ou seja, entre 0 e 25%, o que corresponde a uma vulnerabilidade entre a situação óptima (0%) e a vulnerabilidade aceitável. Pode-se verificar que mesmo quando o consumo aumenta (75 a 100%) a vulnerabilidade mantém-se no nível aceitável (0 a 25%).

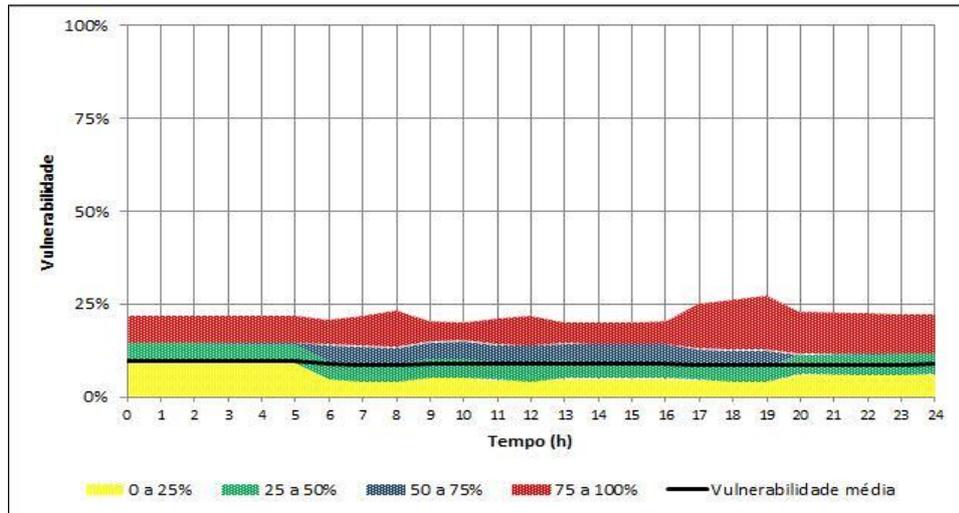


Figura 31 - Diagrama de simulação dinâmica da vulnerabilidade da pressão

Com o desdobramento da curva de vulnerabilidade da pressão nas curvas de vulnerabilidade da pressão mínima (Figura 32) e da pressão máxima (Figura 33), verifica-se que para a pressão mínima a vulnerabilidade média é praticamente 0%, o que corresponde à situação óptima. Pode-se concluir, ainda, que com o aumento do consumo (75 a 100%) a vulnerabilidade é aceitável e para os consumos inferiores a vulnerabilidade corresponde à situação é óptima (0%).

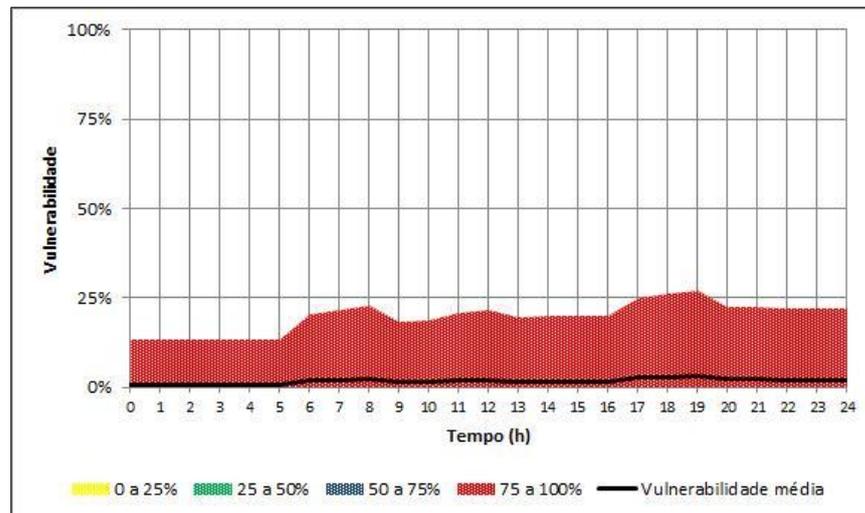


Figura 32 - Diagrama de simulação dinâmica para a vulnerabilidade da pressão mínima

Relativamente à curva de vulnerabilidade da pressão máxima (Figura 33), a vulnerabilidade média é de cerca de 7%, o que corresponde a uma vulnerabilidade entre a situação óptima (0%) e a vulnerabilidade aceitável

(25%), mesmo com o aumento de consumo a vulnerabilidade é aceitável (0 a 25%).

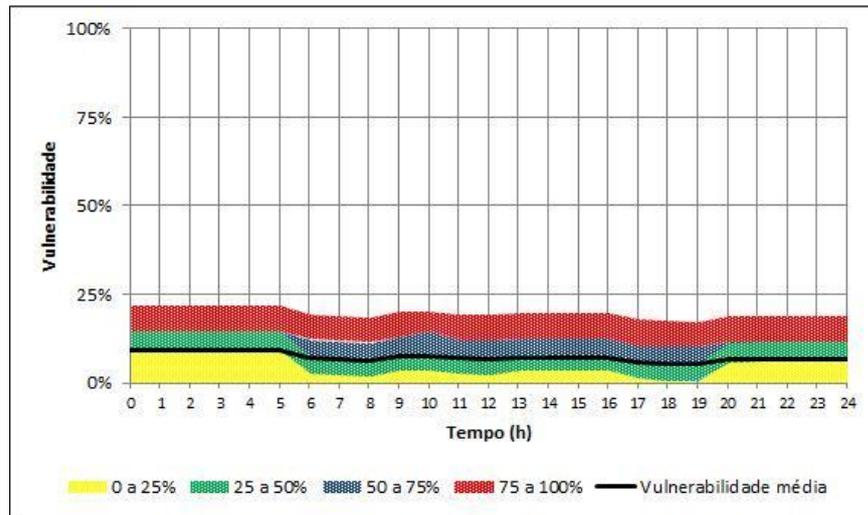


Figura 33 - Diagrama de simulação dinâmica da vulnerabilidade da pressão máxima

A Figura 34 apresenta o diagrama de simulação dinâmica da vulnerabilidade da flutuação de pressão. A vulnerabilidade média é, praticamente, 0%, o que corresponde à situação ótima. Com o aumento do consumo (75 a 100%) a flutuação de pressão aumenta o que provoca um aumento da vulnerabilidade, no entanto, este aumento de vulnerabilidade corresponde a uma vulnerabilidade aceitável.

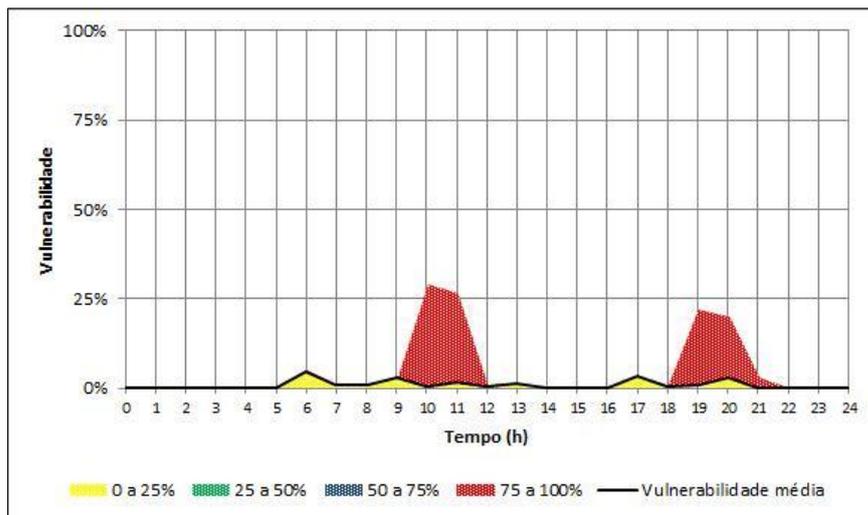


Figura 34 - Diagrama de simulação dinâmica da vulnerabilidade da flutuação de pressão

A vulnerabilidade global do sistema, relativamente à variável pressão, é determinada através da função de generalização referido no subcapítulo 3.3.3.

$$V = W(vm_i) = \sum_{i=1}^N (w_i \cdot vm_i) = 9,79\%$$

Deste modo, o sistema de abastecimento de água de Corte da Velha tem uma vulnerabilidade global, relativamente à variável pressão, de cerca de 10%, o que significa que tem uma vulnerabilidade entre a situação óptima (0%) e a vulnerabilidade aceitável (25%).

Relativamente à vulnerabilidade da velocidade, os resultados apresentam-se de seguida.

Na Figura 35 apresenta-se o diagrama de simulação dinâmica da vulnerabilidade da velocidade de escoamento, ao longo de 24 horas.

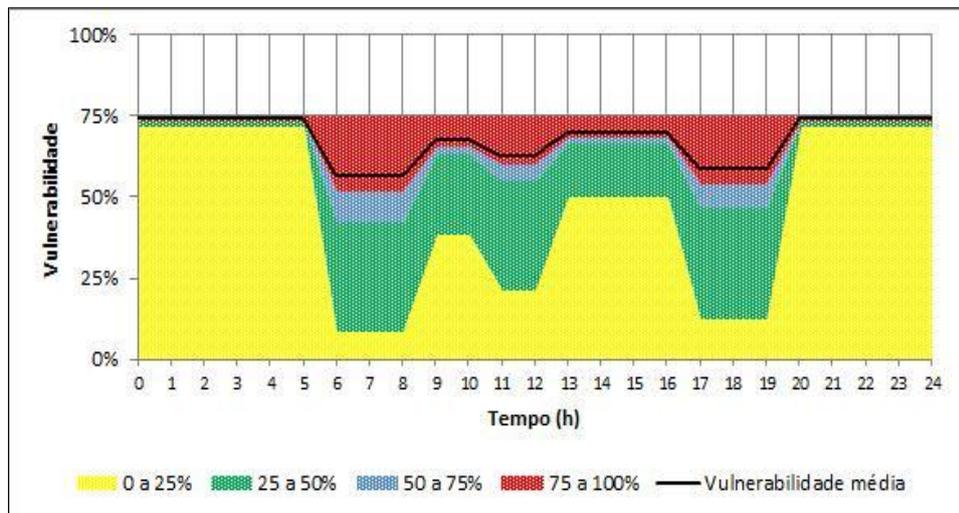


Figura 35 - Diagrama de simulação dinâmica da vulnerabilidade da velocidade

A Figura 35 mostra que a curva de vulnerabilidade média se desenvolve entre a vulnerabilidade minimamente aceitável (50%) e a vulnerabilidade inaceitável (75%). No entanto, a vulnerabilidade nunca ultrapassa o nível da vulnerabilidade inaceitável (75%), o que é explicado pelas velocidades de escoamento muito baixas, como referido anteriormente, inferiores à velocidade de referência. Assim, e como na avaliação do desempenho, o diagrama de simulação

dinâmica da vulnerabilidade da velocidade mínima (Figura 36) é igual ao diagrama de simulação dinâmica da velocidade (Figura 35).

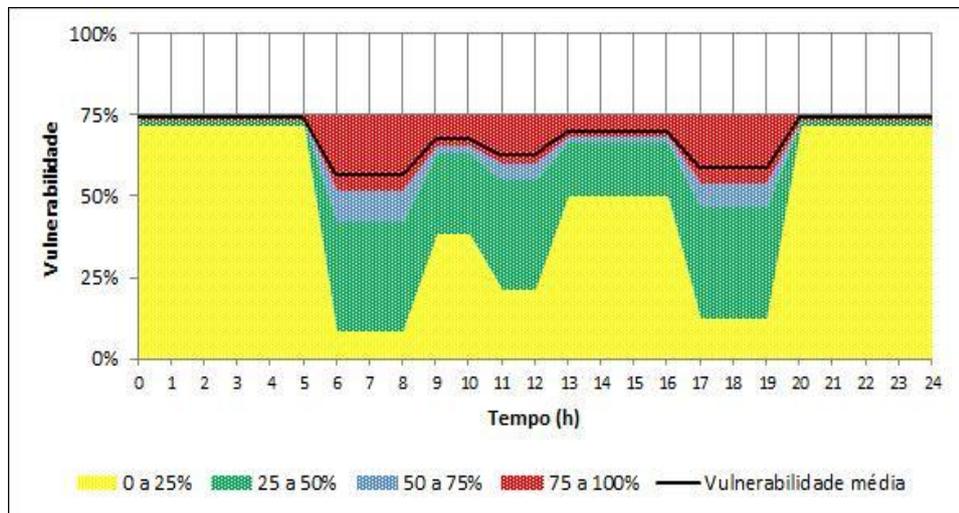


Figura 36 - Diagrama de simulação dinâmica da vulnerabilidade da velocidade mínima

Na Figura 37 apresenta-se o diagrama de simulação dinâmica da vulnerabilidade da velocidade máxima.

Uma vez que a velocidade de escoamento é sempre inferior à velocidade de referência, a vulnerabilidade da velocidade máxima corresponde sempre à situação óptima (0%).

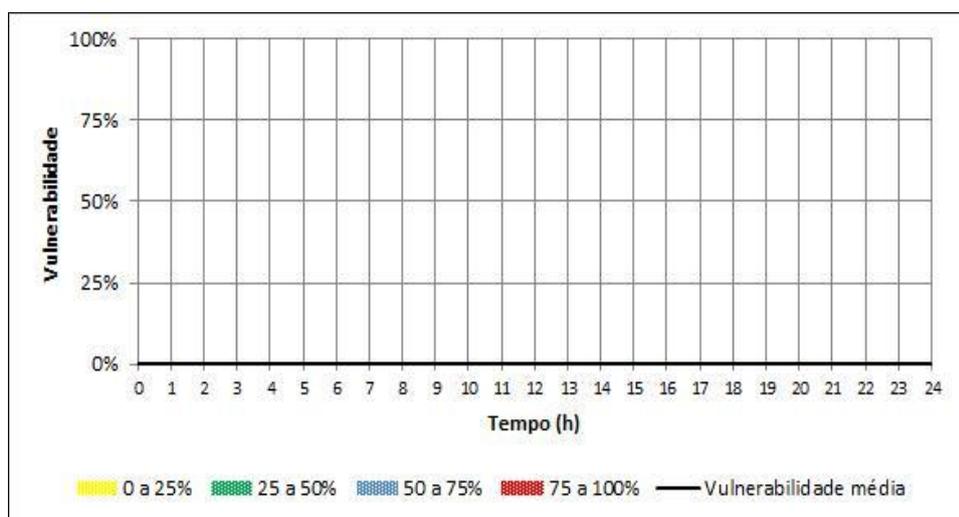


Figura 37 - Diagrama de simulação dinâmica da vulnerabilidade da velocidade máxima

A vulnerabilidade global do sistema, relativamente à variável velocidade de escoamento, é determinada através da função de generalização referida no subcapítulo 3.3.3.

$$V = W(vm_i) = \sum_{i=1}^N (w_i \cdot vm_i) = 63,73\%$$

Deste modo, o sistema de abastecimento de água de Corte da Velha tem uma vulnerabilidade global, relativamente à variável velocidade de escoamento, de cerca de 64%, o que significa que tem uma vulnerabilidade entre o nível minimamente aceitável (50%) e o inaceitável (75%).

4.2.4 APLICAÇÃO DO MODELO DE HIERARQUIA FUZZY À REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE CORTE DA VELHA

O Modelo de Hierarquia Fuzzy permite a hierarquização das zonas elementares da rede de distribuição (troços) mais vulneráveis, possibilitando a definição da prioridade na reabilitação.

Na aplicação do Modelo de Hierarquia Fuzzy é necessário:

1) Definir a matriz de procura;

Como referido anteriormente (subcapítulo 3.4.2), a matriz de procura é definida por seis atributos (tipo de material, comprimento, diâmetro, pressão de serviço, velocidade de escoamento e durabilidade do material) e pelo índice de desempenho da rede quanto ao risco de falha.

Os critérios de peso para cada um dos atributos são os seguintes:

$a_{ij} = \blacksquare$ (crucial) – a procura é intensa pelo atributo em questão, o valor de pertinência é igual a 1;

$a_{ij} = \square$ (condicionante) – a procura é significativa pelo atributo em questão, o valor de pertinência é igual a 0,8;

$a_{ij} = \blacksquare$ (pouco significativa) – a procura é pouco influenciada pelo atributo em questão, o valor de pertinência é igual a 0,6;

$a_{ij} = \square$ (irrelevante) – a procura é praticamente independente do atributo em questão, o valor de pertinência é igual a 0,4.

Na construção da matriz de procura foram consideradas as características específicas do sistema de abastecimento em estudo e, também, a avaliação do desempenho e da vulnerabilidade.

As cargas internas (pressão de serviço e velocidade de escoamento) foram consideradas como factor pouco significativa.

A pressão de serviço, como verificado na avaliação do desempenho apresenta um desempenho global de cerca de 90%, ou seja, o sistema de abastecimento de água de Corte da Velha apresenta, para a variável pressão, um desempenho entre o serviço adequado (75%) e o serviço óptimo (100%). Assim, para o grau de desempenho da rede quanto ao risco de ocorrência de uma falha causada pelo atributo pressão foi considerado pouco significativa (0,6).

Na avaliação do desempenho da variável velocidade de escoamento concluiu-se que o sistema de abastecimento de água de Corte da Velha apresenta um desempenho global de cerca de 36%, o que significa que o desempenho global se encontra entre o serviço inaceitável (25%) e o serviço minimamente aceitável (50%). Concluiu-se, também, que estes valores de desempenho são devidos à velocidade mínima provocada pelos baixos consumos. A velocidade máxima é tradicionalmente a variável que causa mais problemas a nível do desempenho do sistema, mas no caso do sistema de abastecimento em estudo, esta velocidade apresenta um desempenho óptimo (100%). Deste modo, para o grau de desempenho da rede quanto ao risco de ocorrência de uma falha causada pelo atributo velocidade foi considerado pouco significativo (0,6).

Relativamente às propriedades estruturais da conduta, optou-se por atribuir um peso condicionante (0,8) ao diâmetro e ao tipo de material, uma vez que devido a estes atributos há uma maior probabilidade de ocorrência de rupturas ou degradação das condutas do sistema de abastecimento. No que diz respeito ao comprimento, tendo em consideração que a probabilidade de ruptura é maior nos troços de maiores dimensões e que no sistema de abastecimento em estudo poucos são os troços apresentam um comprimento superior a 100 metros, optou-se por atribuir um peso insignificante (0,6).

Tendo em consideração que o projecto de execução do sistema de abastecimento de água de Corte da Velha é de 2001, optou-se por atribuir um peso irrelevante ao atributo durabilidade da conduta e acessórios.

A matriz de procura é apresentada no Quadro 38.

Quadro 38 - Matriz de procura $A=(a_{ij})_{6 \times 1}$

		Grau de desempenho da rede quanto ao risco de ocorrência de uma falha
Propriedade Estrutural	Diâmetro	0,8
	Comprimento	0,6
	Tipo de material	0,8
Cargas Internas	Pressão	0,6
	Velocidade	0,6
Degradabilidade	Durabilidade da conduta e acessórios	0,4
<p>PESOS</p> <p> <input checked="" type="checkbox"/> Crucial <input checked="" type="checkbox"/> Pouco Condicionante <input type="checkbox"/> Condicionante <input type="checkbox"/> Irrelevante </p>		

2) Definir a matriz de oferta;

Na construção da matriz de oferta são considerados quatro níveis de oferta (valores linguísticos), com os seguintes valores numéricos de pertinência:

$b_{ij} = \blacksquare$ (excelente) – a oferta existente é excelente, o valor de pertinência é igual a 1;

$b_{ij} = \square$ (boa) – a oferta existe em nível bom, o valor de pertinência é igual a 0,8;

$b_{ij} = \blacksquare$ (razoável) – a oferta existe em nível médio, o valor de pertinência é igual a 0,6;

$b_{ij} = \square$ (insatisfatória) – a oferta existente é mínima, o valor de pertinência é igual a 0,4.

O primeiro passo para a construção da matriz de oferta é a recolha dos dados de base, por troço de conduta, dos seis atributos da matriz (Quadro 39).

Quadro 39 - Dados de base da matriz de oferta

ID do Troço	Propriedade Estrutural			Cargas Internas		Degradabilidade
	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Tipo de Material	Vulnerabilidade da Pressão (%)	Velocidade (%)	Idade do material (anos)
Tubagem 1	79,8	133	PEAD	6,90	46,74	0-20
Tubagem 2	79,8	182	PEAD	7,74	46,74	0-20
Tubagem 3	79,8	51	PEAD	8,16	46,74	0-20
Tubagem 5	79,8	35	PEAD	8,01	64,20	0-20
Tubagem 6	79,8	10	PEAD	11,64	64,67	0-20
Tubagem 7	79,8	20	PEAD	11,94	65,07	0-20
Tubagem 8	79,8	11	PEAD	14,65	65,47	0-20
Tubagem 9	79,8	46	PEAD	16,18	66,40	0-20
Tubagem 10	55,8	19	PEAD	18,44	74,47	0-20
Tubagem 11	79,8	30	PEAD	9,97	68,00	0-20
Tubagem 13	55,8	28	PEAD	4,20	73,53	0-20
Tubagem 14	55,8	11	PEAD	6,81	74,47	0-20
Tubagem 15	79,8	23	PEAD	2,59	74,47	0-20
Tubagem 16	79,8	29	PEAD	2,94	75,00	0-20
Tubagem 17	79,8	14	PEAD	2,72	74,60	0-20
Tubagem 18	55,8	28	PEAD	2,69	74,47	0-20
Tubagem 19	55,8	24	PEAD	3,53	66,20	0-20
Tubagem 20	55,8	19	PEAD	4,62	64,27	0-20
Tubagem 21	55,8	10	PEAD	2,80	63,73	0-20
Tubagem 22	55,8	6	PEAD	2,06	63,00	0-20
Tubagem 23	55,8	15	PEAD	2,60	62,07	0-20
Tubagem 24	55,8	22	PEAD	2,70	74,47	0-20
Tubagem 27	55,8	9	PEAD	6,47	66,53	0-20
Tubagem 28	55,8	5	PEAD	5,44	73,93	0-20
Tubagem 29	55,8	20	PEAD	4,41	74,47	0-20
Tubagem 30	55,8	19	PEAD	4,21	68,40	0-20
Tubagem 31	55,8	10	PEAD	3,62	69,07	0-20
Tubagem 32	55,8	45	PEAD	5,42	70,40	0-20
Tubagem 34	79,8	63	PEAD	10,09	63,20	0-20
Tubagem 35	79,8	14	PEAD	6,06	74,13	0-20
Tubagem 36	79,8	14	PEAD	4,93	74,60	0-20
Tubagem 37	79,8	34	PEAD	4,37	72,93	0-20
Tubagem 38	79,8	6	PEAD	4,65	72,27	0-20
Tubagem 40	55,8	23	PEAD	7,45	71,73	0-20
Tubagem 41	55,8	21	PEAD	11,14	72,47	0-20
Tubagem 42	55,8	20	PEAD	10,18	73,53	0-20
Tubagem 43	55,8	15	PEAD	8,30	74,47	0-20
Tubagem 44	55,8	29	PEAD	2,95	64,53	0-20
Tubagem 45	55,8	8	PEAD	4,83	65,07	0-20
Tubagem 46	55,8	14	PEAD	7,14	65,60	0-20

Tubagem 47	55,8	10	PEAD	8,03	66,27	0-20
Tubagem 48	55,8	16	PEAD	7,61	67,73	0-20
Tubagem 49	55,8	17	PEAD	6,23	74,47	0-20
Tubagem 50	55,8	20	PEAD	8,74	69,87	0-20
Tubagem 51	55,8	25	PEAD	8,89	74,47	0-20
Tubagem 52	55,8	8	PEAD	10,16	71,27	0-20
Tubagem 53	55,8	12	PEAD	10,75	72,07	0-20
Tubagem 54	55,8	15	PEAD	12,90	72,93	0-20
Tubagem 55	55,8	35,5	PEAD	13,03	71,07	0-20
Tubagem 56	55,8	17	PEAD	11,11	73,53	0-20
Tubagem 57	55,8	26	PEAD	14,26	74,47	0-20
Tubagem 58	55,8	30,5	PEAD	14,25	74,47	0-20
Tubagem 59	55,8	23	PEAD	14,86	71,73	0-20
Tubagem 60	55,8	28	PEAD	15,09	70,40	0-20
Tubagem 63	79,8	13	PEAD	13,66	71,47	0-20
Tubagem 64	79,8	33	PEAD	12,78	71,07	0-20
Tubagem 65	79,8	46	PEAD	11,16	66,93	0-20
Tubagem 66	55,8	64	PEAD	15,01	71,73	0-20
Tubagem 67	55,8	45	PEAD	16,48	74,13	0-20
Tubagem 68	55,8	65	PEAD	17,13	72,47	0-20
Tubagem 69	55,8	14	PEAD	19,46	74,47	0-20
Tubagem 71	79,8	35	PEAD	5,46	56,93	0-20
Tubagem 72	55,8	14	PEAD	2,65	61,53	0-20
Tubagem 73	79,8	52	PEAD	9,07	58,27	0-20
Tubagem 74	55,8	36	PEAD	9,31	65,07	0-20
Tubagem 75	55,8	35	PEAD	8,55	68,67	0-20
Tubagem 76	79,8	49	PEAD	3,70	71,73	0-20
Tubagem 77	55,8	59	PEAD	14,98	68,53	0-20
Tubagem 78	55,8	37	PEAD	14,67	63,20	0-20
Tubagem 79	79,8	78	PEAD	10,80	72,07	0-20

Os valores de vulnerabilidade (pressão e velocidade) apresentados no Quadro 39 foram obtidos através da média dos valores de vulnerabilidade obtidos anteriormente.

O intervalo (0-20) apresentado na degradabilidade é de acordo com os intervalos apresentados no Quadro 18 para o polietileno.

Posteriormente, comparando o Quadro 39 com as notas fornecidas à propriedade estrutural da conduta (Quadro 16), às cargas internas (Quadro 17) e à degradabilidade da conduta (Quadro 18), obtém-se a matriz da oferta (Quadro 40).

Quadro 40 - Matriz de oferta $B=(b_{jk})_{70 \times 6}$

ID do Troço	Propriedade Estrutural			Cargas Internas		Degradabilidade
	Diâmetro	Comprimento	Tipo de Material	Vulnerabilidade da		Durabilidade da conduta e acessórios
				Pressão	Velocidade	
Tubagem 1	0,6	0,8	0,4	1	0,8	1
Tubagem 2	0,6	0,8	0,4	1	0,8	1
Tubagem 3	0,6	1	0,4	1	0,8	1
Tubagem 5	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 6	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 7	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 8	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 9	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 10	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 11	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 13	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 14	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 15	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 16	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 17	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 18	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 19	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 20	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 21	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 22	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 23	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 24	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 27	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 28	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 29	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 30	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 31	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 32	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 34	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 35	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 36	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 37	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 38	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 40	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 41	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 42	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 43	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 44	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 45	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 46	0,4	1	0,4	1	0,6	1

Tubagem 47	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 48	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 49	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 50	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 51	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 52	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 53	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 54	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 55	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 56	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 57	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 58	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 59	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 60	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 63	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 64	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 65	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 66	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 67	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 68	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 69	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 71	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 72	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 73	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 74	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 75	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 76	0,6	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 77	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 78	0,4	1	0,4	1	0,6	1
Tubagem 79	0,6	1	0,4	1	0,6	1
NOTA – Quanto à não vulnerabilidade do material <input checked="" type="checkbox"/> Excelente <input type="checkbox"/> Boa <input checked="" type="checkbox"/> Razoável <input type="checkbox"/> Insatisfatória						

3) Obter a Matriz Produto C;

A matriz produto C é a matriz resultante da multiplicação entre as matrizes de procura (Quadro 38) e de oferta (Quadro 40), através do operador fuzzy apresentado no Quadro 21.

A matriz produto C (Quadro 41) é do tipo $C=(C_{ik})_{70 \times 1}$.

Quadro 41 - Matriz Produto $C=(C_{ik})_{70 \times 1}$

ID do troço	Grau de desempenho da rede quanto ao risco de ocorrência de uma falha	ID do troço	Grau de desempenho da rede quanto ao risco de ocorrência de uma falha
Tubagem 1	5,17	Tubagem 42	4,83
Tubagem 2	5,17	Tubagem 43	4,83
Tubagem 3	5,33	Tubagem 44	4,83
Tubagem 5	5,17	Tubagem 45	4,83
Tubagem 6	4,83	Tubagem 46	4,83
Tubagem 7	4,83	Tubagem 47	4,83
Tubagem 8	4,83	Tubagem 48	4,83
Tubagem 9	4,83	Tubagem 49	4,83
Tubagem 10	4,83	Tubagem 50	4,83
Tubagem 11	4,83	Tubagem 51	4,83
Tubagem 13	4,83	Tubagem 52	4,83
Tubagem 14	4,83	Tubagem 53	4,83
Tubagem 15	4,83	Tubagem 54	4,83
Tubagem 16	4,83	Tubagem 55	4,83
Tubagem 17	4,83	Tubagem 56	4,83
Tubagem 18	4,83	Tubagem 57	4,83
Tubagem 19	4,83	Tubagem 58	4,83
Tubagem 20	4,83	Tubagem 59	4,83
Tubagem 21	4,83	Tubagem 60	4,83
Tubagem 22	4,83	Tubagem 63	4,83
Tubagem 23	4,83	Tubagem 64	4,83
Tubagem 24	4,83	Tubagem 65	4,83
Tubagem 27	4,83	Tubagem 66	4,83
Tubagem 28	4,83	Tubagem 67	4,83
Tubagem 29	4,83	Tubagem 68	4,83
Tubagem 30	4,83	Tubagem 69	4,83
Tubagem 31	4,83	Tubagem 71	4,83
Tubagem 32	4,83	Tubagem 72	4,83
Tubagem 34	4,83	Tubagem 73	4,83
Tubagem 35	4,83	Tubagem 74	4,83
Tubagem 36	4,83	Tubagem 75	4,83
Tubagem 37	4,83	Tubagem 76	4,83
Tubagem 38	4,83	Tubagem 77	4,83
Tubagem 40	4,83	Tubagem 78	4,83
Tubagem 41	4,83	Tubagem 79	4,83

4) Obter a matriz de resultados;

A matriz de resultados é obtida pela razão entre os resultados obtidos na matriz produto (Quadro 41) e do factor de procura.

O factor de procura é obtido pela soma dos valores numéricos da função de pertinência atribuídos aos elementos da matriz A, assim, o factor de procura é igual a 3,8.

A matriz de resultados (Quadro 42) é do tipo $\Delta=(\delta_{jk})_{70 \times 1}$.

Quadro 42 - Matriz de resultados ($\Delta=(\delta_{jk})_{70 \times 1}$)

ID do troço	δ_{ik}	ID do troço	δ_{ik}	ID do troço	δ_{ik}
Tubagem 1	1,36	Tubagem 29	1,27	Tubagem 55	1,27
Tubagem 2	1,36	Tubagem 30	1,27	Tubagem 56	1,27
Tubagem 3	1,40	Tubagem 31	1,27	Tubagem 57	1,27
Tubagem 5	1,36	Tubagem 32	1,27	Tubagem 58	1,27
Tubagem 6	1,27	Tubagem 34	1,27	Tubagem 59	1,27
Tubagem 7	1,27	Tubagem 35	1,27	Tubagem 60	1,27
Tubagem 8	1,27	Tubagem 36	1,27	Tubagem 63	1,27
Tubagem 9	1,27	Tubagem 37	1,27	Tubagem 64	1,27
Tubagem 10	1,27	Tubagem 38	1,27	Tubagem 65	1,27
Tubagem 11	1,27	Tubagem 40	1,27	Tubagem 66	1,27
Tubagem 13	1,27	Tubagem 41	1,27	Tubagem 67	1,27
Tubagem 14	1,27	Tubagem 42	1,27	Tubagem 68	1,27
Tubagem 15	1,27	Tubagem 43	1,27	Tubagem 69	1,27
Tubagem 16	1,27	Tubagem 44	1,27	Tubagem 71	1,27
Tubagem 17	1,27	Tubagem 45	1,27	Tubagem 72	1,27
Tubagem 18	1,27	Tubagem 46	1,27	Tubagem 73	1,27
Tubagem 19	1,27	Tubagem 47	1,27	Tubagem 74	1,27
Tubagem 20	1,27	Tubagem 48	1,27	Tubagem 75	1,27
Tubagem 21	1,27	Tubagem 49	1,27	Tubagem 76	1,27
Tubagem 22	1,27	Tubagem 50	1,27	Tubagem 77	1,27
Tubagem 23	1,27	Tubagem 51	1,27	Tubagem 78	1,27
Tubagem 24	1,27	Tubagem 52	1,27	Tubagem 79	1,27
Tubagem 27	1,27	Tubagem 53	1,27		
Tubagem 28	1,27	Tubagem 54	1,27		

5) Hierarquizar os resultados;

Os valores da matriz de resultados (Quadro 42) são comparados com as classes de desempenho apresentadas no Quadro 43, obtendo-se o Quadro 44, que apresenta a hierarquização dos trechos da rede de distribuição, que apresentam um maior ou menor grau de desempenho do sistema, de abastecimento de água de Corte da Velha, na ocorrência de uma falha no seu normal funcionamento.

Quadro 43 - Classes de desempenho do funcionamento do sistema

Classes de desempenho	δ_{ik}	Índice
Interrupção de serviço	0 - 0.25	100%
Grau de desempenho inaceitável	0.25 - 0.50	75%
Grau de desempenho minimamente aceitável	0.50 - 0.75	50%
Grau de desempenho adequado	0.75 - 1	25%
Grau de desempenho ótimo	≥ 1	0%

De referir que, o índice de vulnerabilidade apresentado no Quadro 43 foi definido tendo por base o índice de vulnerabilidade apresentado no subcapítulo 3.3, em que o índice apresenta uma variação de 0% a 100% e que significa que: 100% - vulnerabilidade máxima; 75% - vulnerabilidade inaceitável; 50% - vulnerabilidade minimamente aceitável (limiar da aceitabilidade); 25% - vulnerabilidade aceitável; e 0% - situação ótima.

Quadro 44 – Hiearquização do índice de vulnerabilidade do sistema

ID do troço	Índice	ID do troço	Índice	ID do troço	Índice
Tubagem 1	0%	Tubagem 29	0%	Tubagem 55	0%
Tubagem 2	0%	Tubagem 30	0%	Tubagem 56	0%
Tubagem 3	0%	Tubagem 31	0%	Tubagem 57	0%
Tubagem 5	0%	Tubagem 32	0%	Tubagem 58	0%
Tubagem 6	0%	Tubagem 34	0%	Tubagem 59	0%
Tubagem 7	0%	Tubagem 35	0%	Tubagem 60	0%
Tubagem 8	0%	Tubagem 36	0%	Tubagem 63	0%
Tubagem 9	0%	Tubagem 37	0%	Tubagem 64	0%
Tubagem 10	0%	Tubagem 38	0%	Tubagem 65	0%
Tubagem 11	0%	Tubagem 40	0%	Tubagem 66	0%
Tubagem 13	0%	Tubagem 41	0%	Tubagem 67	0%
Tubagem 14	0%	Tubagem 42	0%	Tubagem 68	0%
Tubagem 15	0%	Tubagem 43	0%	Tubagem 69	0%
Tubagem 16	0%	Tubagem 44	0%	Tubagem 71	0%
Tubagem 17	0%	Tubagem 45	0%	Tubagem 72	0%
Tubagem 18	0%	Tubagem 46	0%	Tubagem 73	0%
Tubagem 19	0%	Tubagem 47	0%	Tubagem 74	0%
Tubagem 20	0%	Tubagem 48	0%	Tubagem 75	0%
Tubagem 21	0%	Tubagem 49	0%	Tubagem 76	0%
Tubagem 22	0%	Tubagem 50	0%	Tubagem 77	0%
Tubagem 23	0%	Tubagem 51	0%	Tubagem 78	0%
Tubagem 24	0%	Tubagem 52	0%	Tubagem 79	0%
Tubagem 27	0%	Tubagem 53	0%		
Tubagem 28	0%	Tubagem 54	0%		

Da análise efectuada aos resultados do Quadro 44 verifica-se que todos os troços da rede de distribuição, do sistema de abastecimento de água de Corte da Velha, apresentam um grau de desempenho óptimo (0%).

Analisando os atributos, presentes no modelo de hierarquia fuzzy, de cada troço é possível propor soluções de reabilitação para melhorar o grau de desempenho do sistema de abastecimento em estudo, na ocorrência de uma falha no seu normal funcionamento. Uma vez que todos os troços da rede de distribuição apresentam, ao nível da vulnerabilidade, uma situação óptima (0%) não é necessário a reabilitação de nenhum troço da rede de distribuição de água do sistema de abastecimento de água de Corte da Velha.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo apresenta-se uma síntese do trabalho desenvolvido, descrevem-se as principais conclusões e apresentam-se recomendações para trabalhos futuros.

5.1 SÍNTESE DO TRABALHO DESENVOLVIDO

O principal objectivo desta dissertação consistiu na apresentação e aplicação de uma metodologia para hierarquizar as componentes de um sistema de abastecimento de água de modo a definir prioridades na intervenção de reabilitação. Foi aplicada a metodologia ao sistema de abastecimento de água de Corte da Velha. A metodologia aplicada consta dos seguintes passos:

- Avaliação do desempenho do sistema de abastecimento de água em estudo, com base nas curvas de penalidade de desempenho, que permitem analisar e avaliar o comportamento do sistema, em regime quase-permanente, relativamente às variáveis pressão e velocidade de escoamento, que podem indicar a existência de situações anómalas.
- Caracterização do risco tendo por base matrizes decisórias, em que são identificados os perigos passíveis de ocorrer no sistema de abastecimento de água. Posteriormente, são criados cenários tendo por base os perigos considerados e as componentes do sistema expostas a estes perigos. De acordo com a frequência de cada cenário e as consequências de cada perigo é avaliado o risco e, também, a vulnerabilidade do sistema em estudo.
- Avaliação da vulnerabilidade do sistema de abastecimento de água, com base nas curvas de vulnerabilidade, que permitem avaliar a vulnerabilidade do sistema, relativamente às variáveis pressão e velocidade de escoamento.
- Aplicação do Modelo de Hierarquia Fuzzy com base na construção de matrizes que representam a procura e a oferta relativa a seis factores e a setenta zonas elementares (troços) de vulnerabilidade. Tendo em consideração os principais perigos que poderão causar danos no sistema, bem como a vulnerabilidade da infra-estrutura quanto à sua propriedade estrutural, às cargas internas e à deterioração do material são hierarquizadas, de acordo com o índice de vulnerabilidade, as setenta zonas elementares da rede de distribuição do sistema de abastecimento de água em estudo.

5.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

De seguida são descritas as principais conclusões organizadas pelos capítulos que compõem a metodologia.

5.2.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA HIDRÁULICO EM PRESSÃO

A aplicação desta metodologia permitiu concluir que a utilização de curvas de penalidade de desempenho, das variáveis pressão e velocidade de escoamento, possibilitam a determinação do desempenho do sistema de abastecimento em estudo.

Para a variável pressão, pode-se concluir que o sistema de abastecimento de água, em regime quase-permanente, apresenta um desempenho entre o serviço adequado (75%) e o serviço óptimo (100%). Analisando os desempenhos médios, relativos às pressões máximas, mínimas e flutuações de pressão, pode-se concluir o sistema de abastecimento de água apresenta um desempenho óptimo para as flutuações de pressão (100%), um desempenho muito perto do serviço óptimo (98%) para a pressão mínima e no caso da pressão máxima apresenta, igualmente, um desempenho muito perto do serviço óptimo (93%). Estes resultados são comprovados através da função de generalização, em que no global o sistema de abastecimento de água apresenta um desempenho de cerca de 90%, ou seja, um desempenho entre o serviço adequado (75%) e o serviço óptimo (100%).

Relativamente à variável velocidade de escoamento, pode-se concluir que o desempenho médio (varia entre os 26% e os 43%) se encontra entre o serviço inaceitável (25%) e o serviço minimamente aceitável (50%). Da análise do desempenho da velocidade mínima e máxima, conclui-se que os baixos desempenhos verificados se devem às pressões mínimas, uma vez que para a velocidade máxima o desempenho médio é óptimo (100%). Verifica-se, ainda, que os resultados obtidos para a velocidade e para a velocidade mínima são iguais, o que é explicado, pelo facto que as velocidades de escoamento serem sempre inferiores à velocidade de referência. De igual modo, os resultados obtidos pela função de generalização indicam que o sistema de abastecimento de água apresenta na globalidade um desempenho de 36,27%, ou seja, um desempenho entre o serviço inaceitável (25%) e o serviço minimamente aceitável (50%).

Assim, conclui-se que ao nível das pressões o sistema de abastecimento de água de Corte da Velha apresenta um desempenho adequado, muito próximo do desempenho óptimo. No entanto, para a velocidade de escoamento apresenta um desempenho entre o serviço inaceitável e o serviço minimamente aceitável.

5.2.2 CARACTERIZAÇÃO DO RISCO

Da caracterização do risco no sistema de abastecimento de Corte da Velha pode-se concluir que, para os cenários considerados, o sistema de abastecimento apresenta o risco e vulnerabilidades aceitáveis.

5.2.3 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO SISTEMA HIDRÁULICO EM PRESSÃO

A avaliação da vulnerabilidade do sistema de abastecimento de Corte da Velha permite concluir que a utilização das curvas de vulnerabilidade, para as variáveis pressão e velocidade de escoamento, possibilitam a identificação dos troços mais ou menos vulneráveis, bem como a vulnerabilidade global do sistema.

Para a variável pressão conclui-se, que o sistema de abastecimento em estudo, apresenta uma vulnerabilidade média de cerca de 10%, ou seja, entre a situação óptima (0%) e a vulnerabilidade aceitável (25%). Do desdobramento da curva de vulnerabilidade da pressão, nas curvas de vulnerabilidade da pressão mínima e da pressão máxima, conclui-se que para a vulnerabilidade da pressão mínima a vulnerabilidade média corresponde à situação óptima (0%), no caso da vulnerabilidade da pressão máxima a vulnerabilidade média é de cerca de 7%, o que corresponde a uma vulnerabilidade entre a situação óptima (0%) e a vulnerabilidade aceitável (25%). Relativamente à flutuação de pressão a vulnerabilidade média corresponde à situação óptima (0%).

Da aplicação da função de generalização, correspondente, pode-se concluir que a vulnerabilidade global do sistema para a pressão é aceitável (cerca de 10%).

Para a variável velocidade de escoamento conclui-se que a vulnerabilidade média se encontra entre a vulnerabilidade minimamente aceitável (50%) e a vulnerabilidade inaceitável (75%). Do desdobramento da curva de

vulnerabilidade da velocidade de escoamento nas curvas de vulnerabilidade da velocidade mínima e da velocidade máxima, conclui-se que a vulnerabilidade média para a velocidade mínima se encontra entre a vulnerabilidade minimamente aceitável (50%) e a vulnerabilidade inaceitável (75%), no caso da vulnerabilidade da velocidade máxima a vulnerabilidade média corresponde à situação ótima (0%).

Dos resultados da função de generalização conclui-se que a vulnerabilidade é inaceitável (cerca de 64%) para o sistema de abastecimento.

Deste modo, conclui-se que o sistema de abastecimento de água de Corte da Velha apresenta uma vulnerabilidade aceitável, para a pressão. No entanto, para a velocidade de escoamento, o sistema em estudo apresenta uma vulnerabilidade entre o minimamente aceitável e o inaceitável, pode concluir-se, ainda, que esta vulnerabilidade é devida à velocidade mínima de escoamento.

5.2.4 APLICAÇÃO DO MODELO DE HIERARQUIA FUZZY

Da aplicação do Modelo de Hierarquia Fuzzy conclui-se que todos os troços, do sistema de abastecimento de Corte da Velha, apresentam um grau de desempenho ótimo (0%), na ocorrência de uma falha no seu normal funcionamento. Assim, não é necessário proceder-se a ações de reabilitação em nenhum troço da rede de distribuição do sistema de abastecimento em estudo.

Se algum troço apresenta-se um grau de desempenho inaceitável (75%) ou a interrupção de serviço (100%), na ocorrência de uma falha no seu normal funcionamento, é possível apresentar sugestões de forma a melhorar o grau de desempenho (e.g. alteração do diâmetro). Estas sugestões têm por base a análise dos atributos do modelo (propriedade estrutural da conduta, cargas internas e degradabilidade da conduta).

5.3 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

A metodologia descrita no presente trabalho foi aplicada a um sistema de abastecimento de água relativamente recente e que serve um pequeno aglomerado populacional. Esta metodologia pode ser aplicada no futuro a sistema de abastecimento de água de dimensões superiores e que apresentem sinais de envelhecimento de determinadas componentes.

De referir que a situação analisada refere-se apenas ao funcionamento do sistema no seu estado de regime quase-permanente, pelo que seria interessante verificar os resultados obtidos em regime transitório, de forma a obter resultados com maior detalhe em situações de variações do caudal.

A metodologia utilizada permite efectuar o diagnóstico do funcionamento do sistema de abastecimento de água constitui uma ferramenta de apoio à tomada de decisão na reabilitação dos sistemas de abastecimento de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo, D. (2002). *Metodologia para el análisis de riesgo y vulnerabilidad de sistema de agua potable y saneamiento*. III Curso Internacional Microzonificación y su Aplicación en la Mitigación de Desastres. Lima, Perú. Consultado em 10 de Março de 2010, em: <http://www.crid.or.cr/digitalizacion/pdf/spa/doc14621/doc14621.pdf>
- Almeida, A. B. (2004). Incertezas e Riscos no Contexto da Engenharia. *Revista Água & Ambiente*, n.º66, Maio, Ano VI. Lisboa
- Almeida, A. B. (2005). Gestão e Análise do Risco em Engenharia. O Caso dos Vales com Barragens – Exemplo de Aplicação na Engenharia Civil e Actividades em Portugal. Consultado em 2 de Março de 2010, em: <https://fenix.ist.utl.pt/departamentos/decivil>
- Camboim, L. L. W. (2008). *Aplicações de Técnicas de Controle Fuzzy para Sistemas de Abastecimento de Água*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Paraíba. 106 pp.
- Chang, J. F., Chang T. Y. (2006). Adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of water level in reservoir. *Advances in Water Resources*, Vol 29, pp. 1-10
- Coelho, S.T., Loureiro, D., Alegre, H. (2006). *Modelação e Análise de Sistemas de Abastecimento de Água*. Série “Guias Técnicos do IRAR”, IRAR e LNEC. 355 pp.
- Firat, M., Turan, E. M., Yurdusev, A. M. (2009). Comparative analysis of fuzzy inference for water consumption time series prediction. *Journal of Hydrology*, Vol 374, pp. 235-241.
- Gomide, F. A. C., Gudwin, R. R., Tanscheit, R. (1995). Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações. Consultado em 20 de Fevereiro de 2010, em: <ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/gudwin/publications/ifsa95.pdf>
- ISO/DIS 31000: 2008. *Risk management – Principles and guidelines on implementation*. International Organization for Standardization, Genebra, 18pp.
- ISO/IEC Guide 73: 2008. *Risk management – Vocabulary*. International Organization for Standardization, Genebra, 12pp.

- Jacob, A. (2006). *Avaliação de Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água: o caso de estudo da ZMC 320 da EPAL*. Tese de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.
- Kohagura, T. (2007). *Lógica Fuzzy e suas Aplicações*. Trabalho de Conclusão de Curso em Ciência de Computação. Universidade Estadual de Londrina, Brasil. 61 pp.
- Klir, G., Clair, U. H. S., Yuan, B. (1997). *Fuzzy Set Theory – Foundations and Applications*. Prentice Hall.
- Mukaidono, M. (2001). *Fuzzy Logic for beginners*, Singapore. World Scientific.
- Nobre, R.C.M. (2006) *Avaliação de Risco para o Uso e Proteção de Aquíferos. Estudo de caso: Região Metropolitana de Maceió-Al*. Tese de Doutorado em Ciências em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. 311 pp.
- Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais (RGSPDADAR) - Decreto Regulamentar nº23/95 de 23 de Agosto. *Diário da República – I Série – B*. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. Lisboa.
- Ross, J. T. (2004). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. 2ª Edição. John Wiley & Sons.
- Sá Marques, J.A.A., Sousa, J.J.O. (2008). *Hidráulica Urbana – Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais*. Imprensa da Universidade de Coimbra. Coimbra.
- Tanscheit, R. (2009). *Sistemas Fuzzy*. Consultado em 28 de Dezembro de 2009, em: <http://www.inf.ufsc.br/~mauro/ine5377/leituras/ICA-Sistemas%20Fuzzy.pdf>
- Vidigal, P.M. (2008). *Análise Alargada de Parâmetros Técnico-Hidráulicos e Avaliação de Desempenho de Sistemas de Distribuição de Água*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. 197 pp.
- Yurdusev, A. M., Firat, M. (2009). Adaptive neuro fuzzy inference system approach for municipal water consumption modeling: An application to Izmir, Turkey. *Journal of Hydrology*, Vol 365, pp. 225-234.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information And Control*, Vol.8, pp. 338-353.

Zidko, V. (2008). *Avaliação da Vulnerabilidade Baseada na Lógica Fuzzy para a Gestão Operacional de Sistemas de Abastecimento*. Tese de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. 106 pp.

Zimmermann, H. J. (1991). *Fuzzy Set Theory and Its Applications*, Kluwer Boston, 2nd revised edition.