



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

FEUP

REABILITAÇÃO DE INFRA-ESTRUTURAS URBANAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

António André da Costa Vieira

Licenciado em Engenharia Civil (UP)

Dissertação submetida para satisfação parcial dos
requisitos do grau de *Mestre em Engenharia do Ambiente*
(ramo de *Hidráulica e Recursos Hídricos*)

Orientador:

Prof. Doutor J. C. Tentúgal Valente

Co-orientador:

Prof. Doutor Paulo T. Santos Monteiro

Portugal, Janeiro de 2004.

*“De onde vem a electricidade?
Do interruptor.
De onde vem o dinheiro?
Do banco.
De onde vem a água?
Da torneira.”*

Alfred Sauvy

“... a dificuldade não estará, pese embora o seu custo, na instalação de computadores para a informatização dos serviços; a dificuldade está na reorganização e adaptação a que é necessário proceder nesses serviços, para se obter vantagens da informatização ...”

entrevista ao Presidente da Câmara Municipal de Lisboa, *in Jornal de Notícias*, 15 de Agosto de 1993.

À minha querida família, porque me criou;
aos meus queridos amigos, porque me ajudaram.

Resumo

O presente trabalho pretende desenvolver um modelo de calibração aplicado a sistemas de abastecimento de água, baseando-se em hipóteses que se consideram justificadas, características e estruturais do funcionamento destes sistemas, e cuja atribuição é considerada em tese. O método é operacionalmente concretizado por recurso a um algoritmo genético transformado, no qual as variáveis “*rugosidade*” e “*consumo nos nós*” se integram numa inter-influência, ao longo de uma simulação em tempo estendido, considerando-se uma inter-interferência de avaliação cruzada, com consequências que se aplicam a uma inter-dependência de evolução, no algoritmo, de cada uma das variáveis referidas.

Tem-se em vista a possibilidade de se concretizar alguma diminuição da singularidade do sistema de calibração que, estruturalmente, é presente nos modelos matemáticos de simulação de sistema de distribuição de água. Os sistemas complementares, como seja o sistema de amostragem e armazenamento de dados, abordam-se, obtendo-se corolários que possam vir a ser aplicáveis ao diagnóstico, à monitorização, telegestão e actuação automatizada destes sistemas, em exploração.

Como instrumento que possibilitou a justificação e as conclusões da presente dissertação, foi necessário o desenvolvimento, pelo autor, de uma interface de ligação entre a biblioteca de funções externas do *EPANET* e o interpretador de programação informática *MATLAB*, bem como o próprio algoritmo genético utilizado. Ambos estes conjuntos de ferramentas foram implementados sobre a linguagem de programação informática *MATLAB*.

Como explicação adicional do que se compreende dos fenómenos envolvidos, mas também como perspectiva de futuro para a área de investigação que se precursiona, coloca-se um conjunto de propostas e linhas de desenvolvimento e de investigação, sobre as diversas áreas que tocam o tema. Estas propostas pensam-se possuírem potencial para, de algum modo, completar e tornar mais eficiente o método desenvolvido. Estes trabalhos entendem-se realizáveis em linha sequente do presente desenvolvimento, porém de âmbito mais vasto e aprofundado e que aqui, pelo volume e complexidade envolvidos, não se consideram realizáveis.

Abstract

The present work intends to develop a calibration model applied to water supply systems, which is based in hypothesis considered justified, characteristic and structural of these systems' functioning, and whose attribution is considered in thesis. The method is operationally implemented by the use of a transformed Genetic Algorithm, in which the variables “*roughness*” and “*node consumption*” integrate in a inter-influence, along an extended period simulation, considering the presence of a cross-evaluation inter-interference, with consequences that apply to an evolution inter-dependency, in the algorithm, of each of the variables referred.

We foresee the possibility of materializing some reduction of the calibration system's singularity, which is, structurally, present in the available water distribution systems' mathematical simulation models. The complementary systems, such as data sampling and archiving, are approached, obtaining this way corollaries which can be applied to the diagnosis, monitoring, tele-administration and action automation of these systems in exploration.

As an instrument that allowed the justification and the conclusions of the present dissertation, it became necessary the development, by the author, of an interface of connection between the dynamic link library of the *EPANET* modeler, and the *MATLAB* language interpreter, as well as with the used genetic algorithm itself. Both these tools were implemented in *MATLAB* programming language.

As an additional explanation of what is understood about the phenomena involved, but also as a future perspective for the investigation field opened, a set of proposals and development and investigation guidelines on the various areas related to the subject is presented. We think these proposals have the potential to, in some way, complete and turn the developed method more efficient. Although of a wider and deeper scope, these additional tasks are thought to be accomplishable as a sequence of the present development, but the volume and complexity they involve, prevents them to be carried out in this present work.

Agradecimentos

É-me principalmente devido agradecer aos meus orientadores, todo o trabalho que tiveram com a orientação desta dissertação de Mestrado. Ao Prof. Tentúgal Valente não deve ter sido fácil. Agradeço-lhe profundamente as enormes e rápidas leituras e releituras de textos da tese, corrigindo e corrigindo tantas das minhas barbaridades. Ao Prof. Paulo Monteiro, meu querido colega das carteiras da FEUP, dos tempos da juventude que lá se vai passando, agradeço todas as revisões que efectuou bem como todo o incentivo e todo o apoio que dele recebi. A ambos, agradeço as sugestões de caminho, bem como aquela expectativa que, transmitida, me fez ter de ser capaz de desenvolver toda esta tarefa.

Ao Prof. Doutor Alvares Ribeiro, agradeço a atenção com que, mesmo em frente à porta do Departamento de Minas, quem ia para o Almeida Garrett, me respondeu sobre as virtudes e os defeitos da hidráulica, andava eu ainda a me esclarecer sobre as minhas opções da licenciatura.

Ao Prof. Doutor Malafaya-Baptista, agradeço a partilha daquele seu entusiasmo antigo pelos modelos que, “à unha” e pela mão do velhinho *Fortran*, fazia cálculo de redes de distribuição de água. Nunca sozinho, por mim, fora daquelas, circunstância e companhia agradáveis de fins de década de oitenta do século passado, iniciaria a busca desta matriz.

Também agradeço; ao Prof. Ricardo Contreras, da Faculdade de Engenharia da Universidade de Concepcion, no Chile, os elementos de que, graciosamente e de tão longe, me enviou cópias; ao Prof. Doutor Sérgio Teixeira Coelho, bem como ao seu doutorando, o Eng.º Luiz de Sousa Araújo, a ajuda que dispensaram às dúvidas que lhes coloquei, fazendo votos para que a tese que desenvolviam no IST, obtenha todo o sucesso que dela lhe esperam; à Esmeralda, uma pedra preciosa de apoio e simpatia, obrigado.

Ao meu Ex.mo Prof. Paulo Avilez, um outro dos meus excelentíssimos companheiros desta FEUP de tempos áureos, tenho e devo um agradecimento particular pelo visionamento e atribuição de valor que fez sobre a parte do trabalho informático realizado que lhe mostrei. Ao meu querido amigo e Mestre António Silveira, outro agradecimento muito especial por, ao longo de longos anos, não se preocupando todavia com a sua trave, tanto se ter preocupado como o meu argueiro. Ao Paulo Silva e ao Carlos Alberto; obrigado, queridos amigos, pela intenção. À Iolanda, obrigado pelo incentivo e pela ajuda.

De entre todas as outras personalidades que contactei para concretizar esta dissertação, agradeço particularmente a Lewis A. Rossman, não só ser “O” grande autor do *EPANET*, mas também pelas respostas e os esclarecimentos que me transmitiu durante a fase mais delicada, e onde mais arrisquei, do presente trabalho. Agradeço-lhe, sobretudo, pela surpresa de constatar que uma personalidade, que reputo possuidora de uma tão elevada craveira, responde afinal de forma quase instantânea, simples, próxima e acessível, a questões que, um qualquer como eu lhe coloque.

Agradeço a Hartmut Pohlheim, Andrew Chipperfield, Peter Fleming e Carlos Fonseca, do departamento de Automatic Control and Systems Engineering da Universidade de Sheffield, terem disponibilizado publicamente a *toolbox* que foi utilizada de base para verificação da tese.

Devo também um especial agradecimento à biblioteca da FEUP, sem dúvida a melhor biblioteca técnica de engenharia que conheço. Agradeço também à biblioteca

do LNEC porque, sendo complementar das suas falhas, é tão boa como a *nossa*. Aos funcionários de ambas estas instituições agradeço, porque foram inexcedíveis.

Claro que também devo fundamentais agradecimentos aos meus pais por, desde minúsculo, terem sido capazes de me incentivar a me desenvolver. Sem eles, claro que não conseguiria chegar sequer perto deste lugar onde me encontro.

Também, que não podia esquecer a Isabel, minha dilecta esposa. A quem tanta falta fiz enquanto me preocupava com todos estes números e letrinhas. Mais ainda para um compêndio que ela, certamente por não ser da sua especialidade, não vai querer ler.

Ao meu filho Guilherme, agradeço-lhe pelos rasgados sorrisos dobrados dos seus dois meses e meio de idade, que valem por todas as preocupações e lágrimas do mundo.

A toda a minha família, agradeço gostarem de mim, coisa que não é pouca para podermos estar satisfeitos na vida. Ao meu irmão Pedro, agradeço-lhe todas as discussões de matéria que tivemos, sendo certo que, com isso, teve influência no desembrulhar de caminho que construí para este edifício. À D. Júlia, agradeço toda a preocupação e ao P.e David, o exemplo.

Porto, 1 de Janeiro de 2004.

Índice

Resumo	vii
Abstract	ix
Agradecimentos	xi
Índice	xiii
Nomenclatura	xvii
Índice de Figuras	xxi
Índice de Tabelas	xxv
1 Equação do Problema	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS À GESTÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	5
1.2.1 Propriedades físicas dos fluidos	7
1.2.2 Equações da Mecânica dos Fluidos – Equações globais	26
1.2.3 Considerações sobre as formulações disponíveis para cálculo de perdas de carga em condutas	32
1.2.4 Resolução de redes de abastecimento de água.	32
1.2.5 Definição das constantes e contagem das variáveis e equações presentes num sistema de distribuição de água	41
1.2.6 Classificação das redes	42
1.3 ANÁLISE DE TRAÇOS E MODELAÇÃO MATEMÁTICA DA QUALIDADE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	43
1.3.1 Simulação da qualidade em sistemas de distribuição de águas.	46
1.3.2 Métodos de resolução	47
1.3.3 Comentários aos modelos de qualidade e traços aplicados a sistemas de abastecimento de água	48
1.4 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS A REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	51
1.4.1 Equação do problema	51
1.4.2 Classificação dos trabalhos e utilidade	52
1.5 MÉTODOS GERAIS DE OPTIMIZAÇÃO	55
1.5.1 Optimização por tentativa e erro	55
1.5.2 Optimização por enumeração parcial	55
1.5.3 Programação linear	55
1.5.4 Programação não linear	55

1.5.5	Métodos de busca	56
1.5.6	Algoritmos genéticos	56
1.5.7	Método dos mínimos quadrados	56
1.6	ALGORITMOS GENÉTICOS	65
1.6.1	introdução	65
1.6.2	Codificação e função de avaliação	67
1.6.3	Peso de cálculo contido num AG	68
1.6.4	Implementação de um Algoritmo Genético	69
1.6.5	Algoritmo a aplicar no âmbito das hipóteses formuladas no âmbito da presente tese.	70
1.7	ELEMENTOS DE DESENVOLVIMENTO COMPLEMENTAR	73
1.7.1	Análise de frequência, para definição de consumos	73
1.7.2	Tratamento probabilístico de dados	76
1.7.3	Função de frequência e de probabilidade	77
1.7.4	Formas alternativas de ajuste	77
1.7.5	Justificação do desenvolvimento realizado.	80
1.7.6	Coeficiente de correlação	81
1.7.7	Análise de sensibilidade	81
2	Tese	89
2.1	EQUAÇÃO TEÓRICA DO PROBLEMA	89
2.2	FORMULAÇÃO DAS HIPÓTESES DA TESE	91
2.2.1	Abordagem	92
2.2.2	Formas de organização da amostragem	96
3	Demonstração	99
3.1	METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO	99
3.1.1	Codificação dos dados dos elementos populacionais	99
3.1.2	Partes constitutivas do algoritmo	101
3.1.3	Sensibilidade presente	104
3.1.4	Influência da geração inicial de dados	104
3.1.5	Sistemas a integrar	104
3.1.6	Redes hidráulicas para análise do sistema	105
3.1.7	Algoritmo	105
3.1.8	Redes que se analisaram	113
3.1.9	Implementação do algoritmo	119
3.1.10	Resultados obtidos	122
4	Conclusões	175
4.1	DESCRIÇÃO E COMENTÁRIO DOS ELEMENTOS APRESENTA- DOS	175
4.1.1	Introdução	175
4.1.2	Descrição dos testes e resumo dos resultados	176
4.1.3	Discussão	178
4.2	PERSPECTIVA E CONCLUSÕES	181
	Apêndices	187

A	Algoritmo Genético	187
A.1	Programa principal	188
A.2	Sub-rotina <i>ENaltitudes.m</i>	212
A.3	Sub-rotina <i>ENavaliacao.m</i>	215
A.4	Sub-rotina <i>ENavaliacao_C.m</i>	218
A.5	Sub-rotina <i>ENavaliacao_R.m</i>	220
A.6	Sub-rotina <i>ENavaliacaoABS.m</i>	222
A.7	Sub-rotina <i>ENavaliacao.m</i>	223
A.8	Sub-rotina <i>ENcalculoH.m</i>	226
A.9	Sub-rotina <i>ENcalculoHH.m</i>	231
A.10	Sub-rotina <i>ENcomprimentos.m</i>	233
A.11	Sub-rotina <i>ENconsumos.m</i>	235
A.12	Sub-rotina <i>ENcontinuidade_C.m</i>	237
A.13	Sub-rotina <i>ENDiametros.m</i>	239
A.14	Sub-rotina <i>ENdistancia.m</i>	241
A.15	Sub-rotina <i>ENelitismo.m</i>	243
A.16	Sub-rotina <i>ENgenetico_C.m</i>	245
A.17	Sub-rotina <i>ENgenetico_R.m</i>	247
A.18	Sub-rotina <i>ENindices.m</i>	248
A.19	Sub-rotina <i>ENmutacao.m</i>	249
A.20	Sub-rotina <i>ENordem.m</i>	251
A.21	Sub-rotina <i>ENrugosidades.m</i>	252
A.22	Sub-rotina <i>ENtempo.m</i>	254
B	Matlab/Epanet2 DLL Link	259
B.1	Função <i>contents.m</i>	260
	Índice remissivo	265
	Bibliografia	268

Nomenclatura¹

S	área de secção	$[L^2]$
ds	área infinitesimal ou diferencial	$[L^2]$
$\tilde{A}$	área transversal de secção (média)	$[L^2]$
g	aceleração da gravidade	$[L\ T^{-2}]$
h	altura manométrica	$[L]$
bit	uma posição binária de zero ou um	b
$kilobite$	conjunto de 2^{10} posições binárias	kb
$megabite$	conjunto de 2^{20} posições binárias	Mb
$gigabite$	conjunto de 2^{30} posições binárias	Gb
$byte$	conjunto de 2^8 posições binárias	B
$kilobyte$	conjunto de 2^{10} B 's	kB
$megabyte$	conjunto de 2^{20} B 's	MB
$gigabyte$	conjunto de 2^{30} B 's	GB
C_p	calor específico a pressão constante	$[M\ L^2\ T^{-2}]$
C_v	calor específico a volume constante	$[M\ L^2\ T^{-2}]$
Q_e	caudal exterior	$[L^3\ T^{-1}]$
Q	caudal	$[L^3\ T^{-1}]$
α	coeficiente de compressibilidade	$[M^{-1}\ L\ T^2]$
k_c	coeficiente de decaimento central (<i>bulk decay</i>)	$[T^{-1}]$
k_p	coeficiente de decaimento de parede (<i>wall decay</i>)	$[T^{-1}]$
η	coeficiente de elasticidade cinemático	$[L^2\ T^{-2}]$
ε	coeficiente de elasticidade de volume	$[M\ L^{-1}\ T^{-2}]$
k	coeficiente de primeira ordem de decaimento	$[T^{-1}]$

¹Unidades fundamentais: $[M] \equiv massa$; $[L] \equiv comprimento$; $[T] \equiv tempo$ e; $[K] \equiv temperatura absoluta$.

λ	coeficiente de resistência	s/ dimensões
ζ	coeficiente de tensão superficial	$[M T^{-2}]$
ν	coeficiente de viscosidade cinemático	$[L^2 T^{-1}]$
μ	coeficiente de viscosidade dinâmica (ou absoluta)	$[M L^{-1} T^{-1}]$
L	comprimento	$[L]$
s	comprimento	$[L]$
dc	concentração diferencial	$[M L^{-3}]$
C	concentração	$[M L^{-3}]$
$\mathbb{R}$	conjunto de números reais	
k	constante adiabática	s/ dimensões
R	constante dos gases perfeitos	$[L^2 T^{-2} K^{-1}]$
δ	densidade	s/ dimensões
D	diâmetro de conduta	$[L]$
ΔH	diferença de altura manométrica	$[L]$
dr	distância à origem diferencial	$[L]$
Fit	adequação (<i>fitness</i>)	s/ dimensões
$\bar{f}$	média de avaliação	s/ dimensões
f_i	avaliação associada ao conjunto de caracteres de índice i	s/ dimensões
dF	força diferencial	$[M L T^{-2}]$
$d\rho$	massa específica diferencial	$[M L^{-3}]$
ρ	massa específica	$[M L^{-3}]$
mca	metros de coluna de água ²	$[L]$
Re	número de Reynolds	s/ dimensões
J	perda de carga unitária	$[L L^{-1}]$
γ	peso específico	$[M L^{-2} T^{-2}]$
P	ponto geométrico	
dp	pressão diferencial	$[M L^{-1} T^{-2}]$
p	pressão	$[M L^{-1} T^{-2}]$
k	rugosidade equivalente	$[L]$

²unidade definida para a água a 4°C.

θ	temperatura	$[K]$
T	temperatura	$[K]$
dt	tempo diferencial	$[T]$
t	tempo	$[T^{-1}]$
p_v	tensão de vapor	$[M \ L^{-1} \ T^{-2}]$
τ	tensão tangencial	$[M \ L^{-1} \ T^{-2}]$
ψ	velocidade de propagação de ondas elásticas nos fluidos	$[L \ T^{-1}]$
dv	velocidade diferencial	$[L \ T^{-1}]$
U	velocidade média do escoamento	$[L \ T^{-1}]$
V	velocidade	$[L \ T^{-1}]$
$\vec{V}$	velocidade (vectorial)	$\{[L \ T^{-1}] ; [L \ T^{-1}] ; [L \ T^{-1}]\}$
$d\nu$	viscosidade cinemática diferencial	$[L^2 \ T^{-1}]$
dv	volume diferencial	$[L^3]$
V	volume	$[L^3]$

Índice de Figuras

1.1	Novais-Barbosa(1985), [166] e [167].	15
1.2	representação de forças num escoamento.	27
1.3	(Novais-Barbosa(1985)), [167].	34
1.4	(Chipperfield, A., Fleming, P., Pohlheim, H., Fonseca, C, 1994), [44]	65
3.1	Relacionamento de variáveis no algoritmo.	109
3.2	Sistema “ <i>Ramo 1</i> ”.	113
3.3	Sistema “ <i>Ramo 2</i> ”.	114
3.4	Sistema “ <i>Ramo 3</i> ”.	114
3.5	Sistema “ <i>Ramo 4</i> ”.	115
3.6	Sistema “ <i>Ramo 5</i> ”.	115
3.7	Sistema “ <i>Ramo 6</i> ”.	116
3.8	Sistema “ <i>Malha 1</i> ”.	116
3.9	Sistema “ <i>Malha 2</i> ”.	117
3.10	Sistema “ <i>Malha 3</i> ”.	117
3.11	Sistema “ <i>Malha 4</i> ”.	118
3.12	Sistema “ <i>Malha 5</i> ”.	118
3.13	Sistema “ <i>Malha 6</i> ”.	119
3.14	Sistema proposto por Ormsbee, L. E., Wood, D. J. (1986) [171].	122
3.15	Resultado da consola de cálculo – Sistema “ <i>Ramos 1</i> ”.	124
3.16	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “ <i>Ramos 1</i> ”).	125
3.17	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “ <i>Ramos 1</i> ”).	125
3.18	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva <i>real</i> (Sistema “ <i>Ramos 1</i> ”).	126
3.19	Resultado da consola de cálculo – Sistema “ <i>Ramos 2</i> ”.	127
3.20	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “ <i>Ramos 2</i> ”).	128
3.21	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “ <i>Ramos 2</i> ”).	128
3.22	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva <i>real</i> (Sistema “ <i>Ramos 2</i> ”).	129
3.23	Resultado da consola de cálculo – Sistema “ <i>Ramos 3</i> ”.	130
3.24	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “ <i>Ramos 3</i> ”).	131
3.25	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “ <i>Ramos 3</i> ”).	131
3.26	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva <i>real</i> (Sistema “ <i>Ramos 3</i> ”).	132
3.27	Resultado da consola de cálculo – Sistema “ <i>Ramos 4</i> ”.	134

3.28	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “ <i>Ramos 4</i> ”).	135
3.29	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “ <i>Ramos 4</i> ”).	135
3.30	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva <i>real</i> (Sistema “ <i>Ramos 4</i> ”).	136
3.31	Resultado da consola de cálculo – Sistema “ <i>Ramos 5</i> ”.	138
3.32	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “ <i>Ramos 5</i> ”).	139
3.33	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “ <i>Ramos 5</i> ”).	139
3.34	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva <i>real</i> (Sistema “ <i>Ramos 5</i> ”).	140
3.35	Resultado da consola de cálculo – Sistema “ <i>Ramos 6</i> ”.	142
3.36	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “ <i>Ramos 6</i> ”).	143
3.37	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “ <i>Ramos 6</i> ”).	143
3.38	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva <i>real</i> (Sistema “ <i>Ramos 6</i> ”).	144
3.39	Resultado da consola de cálculo – Sistema “ <i>Malha 1</i> ”.	146
3.40	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “ <i>Malha 1</i> ”).	147
3.41	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “ <i>Malha 1</i> ”).	147
3.42	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva <i>real</i> (Sistema “ <i>Malha 1</i> ”).	148
3.43	Resultado da consola de cálculo – Sistema “ <i>Malha 2</i> ”.	150
3.44	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “ <i>Malha 2</i> ”).	151
3.45	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “ <i>Malha 2</i> ”).	151
3.46	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva <i>real</i> (Sistema “ <i>Malha 2</i> ”).	152
3.47	Resultado da consola de cálculo – Sistema “ <i>Malha 3</i> ”.	154
3.48	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “ <i>Malha 3</i> ”).	155
3.49	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “ <i>Malha 3</i> ”).	155
3.50	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva <i>real</i> (Sistema “ <i>Malha 3</i> ”).	156
3.51	Resultado da consola de cálculo – Sistema “ <i>Malha 4</i> ”.	158
3.52	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “ <i>Malha 4</i> ”).	159
3.53	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “ <i>Malha 4</i> ”).	159
3.54	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva <i>real</i> (Sistema “ <i>Malha 4</i> ”).	160
3.55	Resultado da consola de cálculo – Sistema “ <i>Malha 5</i> ”.	162

3.56	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “ <i>Malha 5</i> ”).	163
3.57	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “ <i>Malha 5</i> ”).	163
3.58	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva <i>real</i> (Sistema “ <i>Malha 5</i> ”).	164
3.59	Resultado da consola de cálculo – Sistema “ <i>Malha 6</i> ”.	166
3.60	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “ <i>Malha 6</i> ”).	167
3.61	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “ <i>Malha 6</i> ”).	167
3.62	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva <i>real</i> (Sistema “ <i>Malha 6</i> ”).	168
3.63	Resultado da consola de cálculo – Sistema “ <i>REDE</i> ”.	170
3.64	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “ <i>REDE</i> ”).	171
3.65	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “ <i>REDE</i> ”).	171
3.66	Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva <i>real</i> (Sistema “ <i>REDE</i> ”).	172

Índice de Tabelas

1.1	Conjunto de incógnitas de relacionamento	57
3.1	Cromossoma de rugosidades	100
3.2	Cromossoma de consumos nos nós	100
3.3	Consumo nos nós (L/s), Sistema “ <i>Ramos 1</i> ”:	126
3.4	Rugosidades (mm), Sistema “ <i>Ramos 1</i> ”:	126
3.5	Pressões (mca), Sistema “ <i>Ramos 1</i> ”:	126
3.6	Caudais (L/s), Sistema “ <i>Ramos 1</i> ”:	126
3.7	Consumo nos nós (L/s), Sistema “ <i>Ramos 2</i> ”:	129
3.8	Rugosidades (mm), Sistema “ <i>Ramos 2</i> ”:	129
3.9	Pressões (mca), Sistema “ <i>Ramos 2</i> ”:	129
3.10	Caudais (L/s), Sistema “ <i>Ramos 2</i> ”:	129
3.11	Consumo nos nós (L/s), Sistema “ <i>Ramos 3</i> ”:	132
3.12	Rugosidades (mm), Sistema “ <i>Ramos 3</i> ”:	132
3.13	Pressões (mca), Sistema “ <i>Ramos 3</i> ”:	132
3.14	Caudais (L/s), Sistema “ <i>Ramos 3</i> ”:	133
3.15	Consumo nos nós (L/s), Sistema “ <i>Ramos 4</i> ”:	136
3.16	Rugosidades (mm), Sistema “ <i>Ramos 4</i> ”:	136
3.17	Pressões (mca), Sistema “ <i>Ramos 4</i> ”:	136
3.18	Caudais (L/s), Sistema “ <i>Ramos 4</i> ”:	137
3.19	Consumo nos nós (L/s), Sistema “ <i>Ramos 5</i> ”:	140
3.20	Rugosidades (mm), Sistema “ <i>Ramos 5</i> ”:	140
3.21	Pressões (mca), Sistema “ <i>Ramos 5</i> ”:	140
3.22	Caudais (L/s), Sistema “ <i>Ramos 5</i> ”:	141
3.23	Consumo nos nós (L/s), Sistema “ <i>Ramos 6</i> ”:	144
3.24	Rugosidades (mm), Sistema “ <i>Ramos 6</i> ”:	144
3.25	Pressões (mca), Sistema “ <i>Ramos 6</i> ”:	145
3.26	Caudais (L/s), Sistema “ <i>Ramos 6</i> ”:	145
3.27	Consumo nos nós (L/s), Sistema “ <i>Malha 1</i> ”:	148
3.28	Rugosidades (mm), Sistema “ <i>Malha 1</i> ”:	148
3.29	Pressões (mca), Sistema “ <i>Malha 1</i> ”:	148
3.30	Caudais (L/s), Sistema “ <i>Malha 1</i> ”:	149
3.31	Consumo nos nós (L/s), Sistema “ <i>Malha 2</i> ”:	152
3.32	Rugosidades (mm), Sistema “ <i>Malha 2</i> ”:	152
3.33	Pressões (mca), Sistema “ <i>Malha 2</i> ”:	152
3.34	Caudais (L/s), Sistema “ <i>Malha 2</i> ”:	153
3.35	Consumo nos nós (L/s), Sistema “ <i>Malha 3</i> ”:	156
3.36	Rugosidades (mm), Sistema “ <i>Malha 3</i> ”:	156
3.37	Pressões (mca), Sistema “ <i>Malha 3</i> ”:	157
3.38	Caudais (L/s), Sistema “ <i>Malha 3</i> ”:	157
3.39	Consumo nos nós (L/s), Sistema “ <i>Malha 4</i> ”:	160

3.40	Rugosidades (mm), Sistema “ <u>Malha 4</u> ”:	160
3.41	Pressões (mca), Sistema “ <u>Malha 4</u> ”:	161
3.42	Caudais (L/s), Sistema “ <u>Malha 4</u> ”:	161
3.43	Consumo nos nós (L/s), Sistema “ <u>Malha 5</u> ”:	164
3.44	Rugosidades (mm), Sistema “ <u>Malha 5</u> ”:	164
3.45	Pressões (mca), Sistema “ <u>Malha 5</u> ”:	165
3.46	Caudais (L/s), Sistema “ <u>Malha 5</u> ”:	165
3.47	Consumo nos nós (L/s), Sistema “ <u>Malha 6</u> ”:	168
3.48	Rugosidades (mm), Sistema “ <u>Malha 6</u> ”:	168
3.49	Pressões (mca), Sistema “ <u>Malha 6</u> ”:	169
3.50	Caudais (L/s), Sistema “ <u>Malha 6</u> ”:	169
3.51	Consumo nos nós (L/s), Sistema “ <u>REDE</u> ”:	172
3.52	Rugosidades (mm), Sistema “ <u>REDE</u> ”:	173
3.53	Pressões (mca), Sistema “ <u>REDE</u> ”:	173
3.54	Caudais (L/s), Sistema “ <u>REDE</u> ”:	174

Capítulo 1

Equação do Problema

1.1 INTRODUÇÃO

A reabilitação de redes de distribuição de água constitui uma área de intervenção nestes sistemas que possui um enorme peso. De facto, a permanência no tempo das necessidades da distribuição, nomeadamente pública, aliada à sempre limitada suficiência dos materiais e complexidade operacional e conceptiva das infra-estruturas, obriga permanentemente a realização de intervenções sobre os sistemas.

Este problema manifesta-se desde o momento mais inicial do desenvolvimento/implementação das infra-estruturas, sobretudo, no sentido de se manter a qualidade do serviço, isto é a fiabilidade, a estabilidade e a qualidade industrial do produto distribuído. Mas também no sentido, sempre importante, de se manter a mais equilibrada eficiência técnico-económica de funcionamento das infra-estruturas, face à envolvente de geografia que se pretenda servir.

Também impendem sobre os sistemas de infra-estruturas de abastecimento de água limitações de espaço. Sobretudo no subsolo urbano, que se constitui como um bem estruturalmente escasso e limitado. Os grandes centros, nomeadamente os centros que ofereçam elevadas taxas de crescimento/desenvolvimento, são lugares onde as questões de optimização pesam permanentemente na necessidade de intervenções específicas de reabilitação, no sentido de melhor acomodar fins e resultados múltiplos sobre as redes, em ambientes dotados de elevados stress e mutação.

Deste modo, a reabilitação das infra-estruturas de distribuição de água não se compraza genericamente como uma necessidade que possamos localizar no tempo e que se possa considerar apenas decorrente do envelhecimento ou da eventual transformação da envolvente de solicitação projectada/prevista para os sistemas. Múltiplas questões diversas, como apontado, impelem permanentemente os responsáveis pelos sistemas a observarem e a reflectirem os funcionamentos dos mesmos. E a reabilitarem as redes por reformulação, sempre que este outro tipo de intervenções se possam definir como mais favoráveis que outras, de mera necessidade corrente de conservação e manutenção dos sistemas, ou por limite de suficiência das estruturas

ou dos materiais.

A reabilitação das infra-estruturas de distribuição de água é, deste modo, uma preocupação permanente. Consequência de ser também imperativo desejável permanente, se manterem os sistemas, ao mesmo tempo, o mais possível eficientes e eficazes. Isto é que, dentro do possível, possuam uma exploração mais económica, mas que, concomitante, satisfaçam os seus utilizadores com uma suficiência e razoabilidade definida e que se possa considerar aceitável.

A abordagem destes problemas, todavia, é de complexidade significativa. Encontramos envolvidas questões que nem sempre se oferecerem como reguláveis de forma simples. Para além de se repercutirem em resultados económicos de exploração e preço da prestação do serviço dos sistemas de distribuição, o que implica interesses significativos, oferecem-se, em muitos casos, profundamente implicativas sobre a qualidade de prestação do serviço. E se algumas destas questões poderão ser objectivas ou objectiváveis, outras serão claramente subjectivas. E se parte delas se oferecem apenas com impactos nos custos da actividade distribuidora e da água, ou de cariz organoléptico ou de conforto, na sensibilidade pessoal dos consumidores, outras possuem importantes repercussões na vida das pessoas servidas e respectiva envolvente social e económica, com reflexos e limitações profundas e significativas.

Da contradição de interesses em presença e pela paralela dificuldade de definição do exercício regulador sobre algumas destas matérias, cujo equilíbrio e valor nem sempre se encontrarão completamente definíveis e comparáveis, torna-se relevante qualquer possibilidade que incremente a observabilidade e objectivação do funcionamento dos sistemas. Isto é, quaisquer circunstâncias que, como consequência da sua disponibilidade pelos responsáveis, levem ao melhor enfoque das virtudes e das falhas de funcionamento dos sistemas de distribuição de água, bem como da justificação e melhor definição das necessidades de reabilitações que se encontrem presentes.

Porém são conhecidas as dificuldades sobre as definições das áreas a servir pelos sistemas e respectivas populações, bem como sobre a intensidade e distribuição de solicitação a satisfazer, em áreas urbanas com concretizações muitas vezes difusas e de difícil previsão de crescimento e evolução. Como também o facto de qualquer modificação da envolvente, por pequena que seja, poder aconselhar/justificar mudanças significativas de reconfiguração/reabilitação sobre as redes. Consiga-se, para fundamentar as conclusões necessárias, amostras suficientes de dados e resultados, consequentes efectivos dos funcionamentos dos sistemas de distribuição, bem como uma matriz de análise suficientemente eficiente no sentido da possibilidade de elaboração de diagnósticos, projecção de prognósticos e justificação de terapêuticas.

A análise das ferramentas que permitam aos gestores dos sistemas de distribuição de água melhor concretizar a necessidade permanente de acompanhamento dos sistemas, constituir-se-á como a matéria mais interessada da presente dissertação.

Sobretudo no sentido da obtenção de dados/resultados e particularmente os procedimentos e mecanismos de calibração e de determinação dos parâmetros dos modelos matemáticos aplicáveis a estes sistemas de infra-estruturas.

Foi neste sentido indicado que mais se pretendeu desenvolver a presente dissertação, esperando-se que os resultados alcançados, de algum modo, possam contribuir para algum grau de evolução neste importante aspecto da actividade humana que é envolvido no funcionamento das redes de infra-estruturas de distribuição de água. A despeito de, no início do desenvolvimento do presente trabalho se pensarem abordáveis, em termos gerais, quer os sistemas de abastecimento de água, como também os de drenagem de águas residuais. Tais objectivos mais latos, porém, vieram a se abandonar, focando-se a dissertação apenas ao conteúdo e às matérias relacionadas com a calibração de sistemas e validação de modelos matemáticos, aplicados a redes de abastecimento de água.

1.2 MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS À GESTÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Os modelos matemáticos de redes de distribuição de água, de forma substitutiva à manobra e observação directa sobre sistemas protótipo, constituem-se, nos modos explicados na introdução do equacionamento do problema, como uma inestimável ferramenta para a sua mais correcta gestão. Da forma simulada poder-se-ão poupar muitos dos custos associados à realização de manobras sobre redes em exploração em que, muitas delas constituem-se mesmo como inadequadas, principalmente em relação a danos que poderiam ser certamente criados aos utentes das redes, mas também sob a forma de riscos sobre a própria integridade e estabilidade física das infra-estruturas que pretendemos colocar sob este regime de obtenção de dados e possibilidade de análise.

Para se alcançarem resultados completos e equivalentes das redes, bastará, no caso mais simples da simulação matemática, a mudança de variáveis sobre um sistema de equações e respectivo cálculo. Questões que hoje se encontram completamente banalizadas pela moderna hiper-capacidade, nesta área da informática, dos processadores e computadores actuais. E não de todo um conjunto extenso de actuações físicas, manuais ou remotamente tele-accionadas, sobre sistemas de acessórios de controlo e de condutas. Esta última perspectiva possui muitas vezes exigências complexas e extensas, o bastante, para tornar gigantesca a actuação mais simples e a obtenção da menor transformação de funcionamento e resultado.

Também encontramos muito mais facilmente nos sistemas simulados, francas possibilidades para a compreensão e estudo de situações de operação extremas. Indesejavelmente ou mesmo impossivelmente recriáveis com amplitude numa rede real.

E estudarmos o protótipo, efectuando manobras e alterações bruscas e violentas sobre ele próprio, directamente, penalizaria em alguns casos tão enormemente o funcionamento da rede que tornaria esta perspectiva um verdadeiro contra-senso ou mesmo um desastre. Nomeadamente se atendermos a que o objectivo de qualquer análise que pretendamos desenvolver neste campo, deva possuir sempre o sentido de melhorar o desempenho dos sistemas. E não o de o penalizar, mesmo que transitoriamente, sobretudo se resultados de compatibilidade e aproximação suficientes forem alcançáveis por outros meios suaves alternativos. Sejam capazes de os compreender e dominar.

Em concepção de sistemas de distribuição de água, a modelação matemática permite um completo *faz-de-conta-que-a-rede-existe*, que muito útil se torna, nomeadamente para se abordar limites. Como também para se poder escolher mais facilmente a estrutura mais económica e eficaz, que possa responder ao conjunto de solicitações que projectemos para a estrutura hidráulica em concepção. Benefício

que também é aplicável, e ainda com maior ênfase, à abordagem da identificação e da concepção das reabilitações necessárias para um determinado sistema de infra-estruturas de distribuição de água.

Se assim alcançável para os sistemas de distribuição de água, isto é, se podemos tornar verdadeiro um relacionamento matemático entre as variáveis presentes numa rede de distribuição, é-nos permitido transformar alguns dados limitados, que amostremos dos sistemas reais, em resultados mais extensos, inferidos ou determinados pela intermediação das equações que conseguirmos estabelecer para o sistema. Mas resultados este que se oferecerão de forma suficientemente aproximada, ou mesmo possuindo tipo equivalente de obtenção, como se a medida em causa fosse realizada na sua forma própria e exclusiva. É este por exemplo o caso da rugosidade de condutas, que nunca é medida directamente, mas sempre como consequência do relacionamento observado entre velocidades de escoamento, viscosidade da água e perdas de carga unitárias nas condutas, como se verá adiante.

Deste modo, e dado os diferenciais de custo de medição e observação também existentes entre as diversas variáveis físicas em apreço nas redes de distribuição de água, torna-se a simulação matemática destes sistemas, bem como os trabalhos de calibração e validação perante a rede protótipo que lhe esteja associada, uma forma particularmente atractiva, em termos técnicos, económicos e operacionais, para a multiplicação do conhecimento sobre o estado geral e as circunstâncias de operação dos sistemas de distribuição de água. E esta circunstância é particularmente feliz e de particular conveniência, no sentido de se poder alcançar uma mais ampla e mais conveniente justificação das definições e dos interesses envolvidos na sua gestão.

Porém, para aceitarmos qualquer semelhança de resultados entre um modelo e uma rede real de distribuição de água, é fundamental podermos compreender o conjunto de relacionamentos significativos existentes entre as variáveis do fenómeno. Deduzidos a partir de equações físicas que sejam efectivamente aplicáveis com razoabilidade, de forma válida e o mais reduzido que a complexidade dos fenómenos nos permita de realizar. E que possamos aproximar os parâmetros que utilizemos no modelo, por calibração verificável, validando o sistema matemático ao sistema físico que pretendamos estudar e gerir.

As equações gerais envolvidas nestes modelos matemáticos têm essencialmente por base as características dos fluidos e do escoamento.

No sentido de apresentar o edifício mais significativo dos modelos matemáticos de simulação aplicáveis ao funcionamento das redes de distribuição de água, começar-se-á pela apresentação das propriedades físicas dos fluidos, passando-se pelas características gerais dos escoamentos, as variáveis a considerar na mecânica dos fluidos bem como, finalmente, as equações da mecânica dos fluidos.

Os fundamentos desenvolvidos respeitarão em larga medida o apresentado no compêndio de Novais-Barbosa (1985) [166, 167], daqueles que se conhecem, o que

se apresenta com melhor didáctica e aprofundamento em relação à explanação deste tipo particular de problema teórico geral, necessário de compreender para a possibilidade de explanação e justificação da tese que, sobre esta matéria, se desenvolveu.

1.2.1 Propriedades físicas dos fluidos

Os fluidos definem-se como sendo corpos que experimentam deformações que vão aumentando indefinidamente quando submetidos a esforços tangenciais, por mais pequenos que estes esforços se apresentem. Os fluidos possuem comportamentos muito diferentes daqueles que são apresentados pelos corpos elásticos, dado que estes últimos quando sujeitos a um esforço cortante finito (e que seja inferior à sua tensão de cedência, naturalmente) apresentam um deslocamento finito que é, de algum modo e normalmente, proporcional ao esforço a que sejam submetidos.

As substâncias plásticas ora podem comportar-se como corpos elásticos, ora como corpos fluidos, dependendo a reacção do grau de esforço cortante que se faça actuar sobre o corpo. Muitos corpos plásticos ao apresentarem características que podem ser mistas entre sólidos e líquidos, podem inclusivamente sofrer fenómenos de fluidificação localizada, dado se poderem apresentar em determinadas condições como sólidos e, enquanto sólidos, poderem acumular em determinados pontos tensões que façam eclodir comportamentos fluidos localizados no material. Este fenómeno, no sentido indicado, pode ser observado, por exemplo na superfície de contracto do pneu de uma viatura com o pavimento ao longo de uma travagem violenta ou na fluidificação de uma goma grafítica de lubrificação na chumaceira de um mecanismo.

Este tipo de fenómenos indicados podem inclusivamente apresentar características que alterem as condições de equilíbrio do corpo, como conjunto, se entendido de forma mais essencial como estrutura sólida, ou decorrer mesmo de comportamentos do tipo reológicos que possam depender do historial de solicitação/tensão a que os materiais tenham sido sujeitos.

Em prol do rigor, importa também referenciar-se que muitos corpos identificados normalmente como sólidos, cumprem na realidade a definição de fluido. Isto acontece em virtude das características que definem o fluido serem, como indicado, essencialmente a presença de uma deformação transversa infinita do corpo, como reacção a forças de magnitude diferente de zero, que se encontrem presentes. Daqui decorrer, por exemplo, que o vidro ao se apresentar também cumprindo esta definição, ter também de ser considerado um fluido. A despeito de possuir uma viscosidade (conceito a definir mais adiante) muitíssimo elevada, e ser este valor característico deste material que nos engana na sua classificação como corpo.

A definição apresentada de fluido engloba os líquidos e os gases, sendo a distinção entre ambos efectuada pelo grau de compressibilidade que os corpos evidenciem. O presente estudo e objectivos finais incidirão apenas sobre a água em estado líquido e condições normais de pressão e temperatura.

Peso e massa

O *peso* representa a força atractiva exercida pela Terra sobre um determinado corpo, e *massa*, a quantidade de matéria que esse mesmo corpo contenha. Considerando o valor destas grandezas por unidade de volume, tem-se respectivamente o *peso volúmico* e a *massa volúmica* (que por vezes se vêm designados por *peso específico* e *massa específica*), os quais serão representadas em termos de notação por, respectivamente, γ e ρ .

Densidade

A *densidade*, δ , é o quociente entre a massa de um certo volume da substância que se pretende medir, e a massa de igual volume de água à temperatura de 4°C submetida a condições normais de pressão. Esta propriedade física geral dos corpos não possui dimensões, dado se constituir como um quociente entre duas quantidades de massa, relativas a um idêntico volume. A densidade obtém um valor de medida relativa de massa específica do corpo, segundo um referencial em que a unidade fundamental presente é a massa específica da água colocada a 4°C e submetida a condições normais de pressão.

A variação da pressão altera o valor da densidade, dado a propriedade de compressibilidade dos fluidos resultar numa variação de volume com conservação de massa. Todavia esta influência é pouco significativa para a água e para os líquidos em geral, dado o pequeno grau relativo de compressibilidade que apresentam, nomeadamente quando comparado em termos relativos aos gases.

Facilmente se conclui que a densidade, δ , pode ser obtida de forma indiferente como o quociente entre massas ou pesos volúnicos dos corpos, desde que se considere respectivamente como constante de relacionamento respectiva, a massa específica da água e o peso específico da água, nas mesmas condições de massa e peso específicos que esta matéria de relacionamento padrão, para a densidade, oferece a 4°C .

Isotropia

Os fluidos possuem, em geral, a propriedade da *isotropia*. Isto é, apresentam as suas diversas características de igual modo em todas as direcções. Existem, contudo, substâncias que apresentam fluidez que não é isotrópica, mas esta circunstância não é do interesse do presente estudo que incide essencialmente sobre a água em condições normais de pressão e temperatura, situação que se apresentará sempre de forma completamente isotrópica.

Admitir-se-á que no interior das redes de distribuição de água não ocorre o fenómeno da cavitação. Este facto, ao introduzir a presença instantânea de vaporizações localizadas, pode criar condições para a presença de algumas características de não isotropia, também localizadas, nos comportamentos da água e do escoamento.

Também se admitirá a não ocorrência do congelamento da água nos sistemas de distribuição, circunstância que alteraria de tal modo o estado da água que, com os presentes pressupostos de comportamento desenvolvidos, se inviabiliza qualquer conclusão que se pretenda retirar sobre esta matéria.

Continuidade

A despeito de, na realidade, os fluidos serem compostos a partir de partículas moleculares, ir-se-á no âmbito do presente trabalho admitir que os meios fluidos em estudo sejam contínuos. Efectuar-se-á assim, e sempre que necessário, uma extensão das definições já apresentadas de massa e peso volúmicos a uma distribuição contínua, ignorando-se a verdadeira realidade material. Esta distribuição de massa corresponderá perfeitamente aos objectivos da mecânica dos fluidos, nomeadamente para o âmbito do presente trabalho, justificando a aplicação extensiva quer dos conceitos de cálculo diferencial, quer integral (conceptualmente apoiados na consideração de pequenos diferenciais, infinitamente pequenos), quer de métodos numéricos de elementos e diferenças finitas (conceptualmente apoiados na consideração nodular de pequenos diferenciais finitos).

Coefficiente de compressibilidade e módulo de elasticidade de volume de um fluido

A *compressibilidade* é, por definição primeira, a propriedade que resulta numa diminuição de volume de um fluido dv , consequência de um aumento de pressão dp . Todavia, pela aplicação do princípio da conservação da massa a uma variação de volume, corresponderá uma variação inversa da massa específica. Deste modo, a compressibilidade pode representar-se, também, através de um relacionamento de um diferencial de pressão com um determinado diferencial de massa específica.

Pela formulação de compressibilidade que foi anteriormente apresentada, e considerando-se ser dv/V a variação relativa do volume V , correspondente a um aumento de pressão dp , α , o coeficiente de compressibilidade, exprimir-se-á pela expressão (1.1).

$$\alpha = \frac{-\frac{dv}{V}}{dp} = -\frac{1}{V} \frac{dv}{dp} \quad (1.1)$$

Por outro lado, sendo massa específica, ρ , representada pela expressão (1.2),

$$\rho = \frac{Massa}{V} \quad (1.2)$$

poder-se-á concluir que, existindo uma variação de volume dv , esta variação pode-se computar também, de forma decorrente, por uma variação equivalente de massa específica. Esta variação poderá ser sucessivamente deduzida pelas equações equivalentes seguintes

$$\begin{aligned}\rho + d\rho &= \frac{Massa}{V+dv} \Leftrightarrow d\rho = \frac{Massa}{V+dv} - \rho \Leftrightarrow d\rho = \frac{Massa}{V+dv} - \frac{Massa}{V} \Leftrightarrow d\rho = \\ &= Massa \left(\frac{1}{V+dv} - \frac{1}{V} \right) \Leftrightarrow d\rho = Massa \left(\frac{V-V-dv}{V^2+Vdv} \right) \Leftrightarrow d\rho = -\frac{Massa}{V^2+Vdv} dv.\end{aligned}$$

Considerando $V \times dv$ um infinitésimo de grau relativo desprezável em relação ao valor de V^2 , e $k = Massa/V^2$ uma constante, daqui se obtém a equação (1.3),

$$d\rho = k \times dv \quad (1.3)$$

e, por sua vez, a relação (1.4), inversa de (1.3).

$$dv = \frac{1}{k} \times d\rho \quad (1.4)$$

Nestas equações, (1.3) e (1.4), k representa um valor de proporcionalidade que relaciona os diferenciais $d\rho$ e dv . Porque de (1.2) sabemos que $\rho = \frac{Massa}{V}$ e que $k = -\frac{\frac{Massa}{V}}{V} = -\rho/V$, então concluir-se-á que k será um coeficiente relativo a um determinado valor de massa específica e volume, presentes no corpo.

A existir, no fluido, uma variação de volume dv , função de uma variação de pressão dp , pela lei de conservação da massa ($\rho V = constante$), existirá correspondentemente uma variação de massa específica $d\rho$, também função dessa diferença de pressão dp , que se queira presente na amostra sob medição.

O relacionamento entre o quociente da variação de volume e a variação de pressão, e a variação de massa específica e a variação de volume presente num determinado corpo, pode ser representado considerando o conjunto de expressões (1.5), (1.4) e (1.6),

$$\alpha = -\frac{1}{V} \frac{dv}{dp} \quad (1.5)$$

$$\frac{1}{k} = -\frac{V}{\rho} \quad (1.6)$$

que resultam sucessivamente em

$$\alpha = -\frac{1}{V} \frac{dv}{dp} \Leftrightarrow \alpha = -\frac{1}{V} \frac{\frac{1}{\rho} d\rho}{dp} \Leftrightarrow \alpha = \frac{1}{V} \frac{-\frac{V}{\rho} d\rho}{dp}.$$

Deste desenvolvimento deduz-se que o coeficiente de compressibilidade, α , efectuadas as respectivas reduções e transformações sobre as equações (1.5), (1.4) e (1.6), apresentadas, também se pode representar pela igualdade equivalente de relacionamento entre diferenciais de massa específica e diferenciais de pressão sofrida pelo corpo, do modo indicado pela equação (1.7) seguinte.

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1.7)$$

No Sistema Internacional (SI) o coeficiente de compressibilidade exprime-se em m^2/N , $[L M^{-1} T^2]$, sendo o seu valor normal para a água de $5,11 \times 10^{-9} m^2/N$.

Dá-se o nome de coeficiente de elasticidade de volume (ou módulo de elasticidade de volume), ao inverso do coeficiente de compressibilidade, representando-se normalmente esta propriedade por ε .

$$\varepsilon = \frac{1}{\alpha} = -V \frac{dp}{dv} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1.8)$$

O coeficiente de elasticidade de volume de um fluido, representado na equação (1.8), possui as dimensões de uma pressão, exprimindo-se, em unidades SI, em N/m^2 .

O significado físico do coeficiente de compressibilidade ε , será tal que, dados dois estados de um fluido, definidos por dois conjuntos de valores $\{\rho_1, V_1, p_1\}$ e $\{\rho_2, V_2, p_2\}$, existirá o relacionamento indicado na equação (1.9).

$$p_2 - p_1 = \varepsilon \times \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (1.9)$$

Uma das distinções fundamentais entre líquidos e gases encontra-se na diferença de valores relativos de compressibilidade (muito grande nos gases e muito pequeno nos líquidos), variável presente na anterior equação (1.9), representada.

Módulo de elasticidade de volume cinemático

Nas dimensões do coeficiente de compressibilidade e do coeficiente de elasticidade de volume, atrás desenvolvidos sobre (1.1) e (1.8), figura a massa específica, que se pode exprimir por relações físicas directas entre peso, massa e aceleração da gravidade, como um valor relacionável com a massa dos corpos.

Deste modo, as grandezas definidas no parágrafo respectivo, expressar-se-ão apenas numa perspectiva dinâmica. Uma definição cinemática poderá, no entanto, ser encontrada pelo quociente destas variáveis, com a massa volúmica, ρ .

No caso do módulo de elasticidade de volume, ε , caso que mais interessa de determinar por possuir significado físico próprio, obtém-se a equação (1.10).

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\rho} \quad (1.10)$$

Esta variável representada em (1.10), η , designa-se por módulo cinemático de elasticidade de volume, que representa uma propriedade que se relaciona de forma directa com a velocidade de propagação do som no fluido em análise. O fenómeno de propagação do choque hidráulico em condutas, também se relaciona com esta variável, mas acrescenta o valor do módulo de elasticidade da conduta onde se desenrole o escoamento.

O coeficiente de compressibilidade pode exprimir-se em função da massa volúmica, ρ . Esta via de demonstração obtém-se diferenciando a lei de conservação da massa ($\rho V = \text{constante}$), daqui resultando a equação (1.11).

$$V dp + \rho dv = 0 \quad (1.11)$$

Ou seja

$$-\frac{dv}{V} = \frac{d\rho}{\rho} \quad (1.12)$$

Desta equação (1.12), obtém-se (1.13),

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1.13)$$

formulação já obtida por outra via de demonstração anteriormente apresentada.

No caso dos líquidos, dada a sua reduzida compressibilidade, pode admitir-se que o coeficiente α se mantém constante no intervalo de integração, pelo que se obtém (1.14),

$$\alpha(p - p_0) = \ln \frac{\rho}{\rho_0} \quad (1.14)$$

correspondendo p_0 e ρ_0 a valores iniciais da pressão e massa volúmica. Resulta então

a equação (1.15).

$$\rho = \rho_0 e^{\alpha(p-p_0)} \quad (1.15)$$

Nos gases perfeitos a equação de estado tem o aspecto indicado em (1.16),

$$pV = RT \quad (1.16)$$

ou, considerando a unidade de massa (caso em que V iguala $1/\rho$),

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1.17)$$

em que R é a constante dos gases perfeitos e T a temperatura absoluta.

A expressão (1.17) tomará ainda aspectos diferentes, conforme o tipo de transformação termodinâmica presente.

Para processo isotérmico ($T = \text{constante}$), virá

$$\frac{p}{\rho} = \text{constante} \quad (1.18)$$

Diferenciando (1.18), obtém-se

$$\frac{dp}{\rho} - \frac{p}{\rho^2} d\rho = 0 \quad (1.19)$$

ou, ainda

$$\rho dp - p d\rho = 0 \quad (1.20)$$

e

$$p = \rho \frac{dp}{d\rho} = \frac{1}{\alpha} = \varepsilon \quad (1.21)$$

No caso da transformação isotérmica, o módulo de elasticidade de volume é igual à pressão.

Se o processo for adiabático, ou seja se não se verificarem trocas de calor com o

meio exterior, a equação de estado escrever-se-á

$$\frac{p}{\rho^k} = \text{constante} \quad (1.22)$$

sendo $k = (C_p/C_v)$ a constante adiabática (igual ao quociente dos calores específicos a pressão e volume constantes). Diferenciando esta equação obtém-se (1.23),

$$\frac{dp}{p} = k \frac{d\rho}{\rho} \quad (1.23)$$

e então

$$\frac{1}{p k} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} = \alpha \quad (1.24)$$

resultando em que

$$\varepsilon = k \times p \quad (1.25)$$

Isto é, do desenvolvimento representado por (1.23), (1.24) e (1.25), conclui-se que o módulo de elasticidade, ε , é proporcional à pressão, sendo k , a constante adiabática, o coeficiente de proporcionalidade.

A unidade que representa a grandeza de pressão no Sistema Internacional é o *pascal*, variável que se expressa a partir das unidades fundamentais N/m^2 .

Pela sua aplicação prática ao domínio da água, nomeadamente na hidromecânica de redes de distribuição hidráulica, também se particulariza a medição da pressão em *metros de coluna de água (mca)*. Dado não existir propriamente uma definição formal desta unidade de pressão, definir-se-á que 1 *mca* representa a pressão de um ponto colocado no interior de uma massa líquida de água à temperatura de 4°C, aproximadamente à altitude média do mar, em repouso e localizado a um metro¹ da superfície livre do líquido.

Viscosidade

A *viscosidade* dos fluidos define-se como uma medida que relaciona a força transversal aplicada, com a velocidade de deformação obtida. A viscosidade, deste modo, representa uma medida dinâmica, que não se manifesta sobre fluidos colocados em

¹Pressupõe-se nesta definição de pressão que a *água* que serve de referencial não se encontra em tal estado de pressão que essa situação lhe altere as suas características físicas, nomeadamente de peso específico.

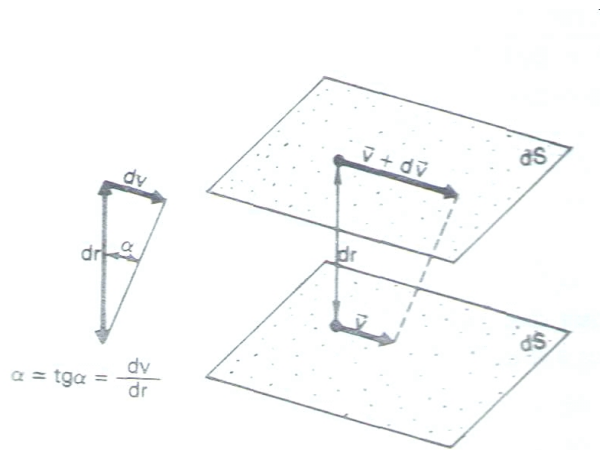


Figura 1.1: Novais-Barbosa(1985), [166] e [167].

condições de repouso. A viscosidade é assimilável a uma espécie de atrito interno, que se exerce entre partículas contíguas que se deslocam, umas em relação às outras, com velocidades relativas diferentes.

A nível molecular, contudo, a viscosidade não se manifesta sobre o movimento browniano das partículas constituintes do fluido, dado não se originar, por via da viscosidade, a dissipação da temperatura, a medida desta movimentação aleatória de partículas que constitui em geral a situação da matéria, em particular dos fluidos. A viscosidade não se encontra assim associada ao movimento atómico de partículas no seio fluido, mas sim, apenas, a movimentos generalizados de massa.

No entanto, a temperatura, factor que representa mais directamente a energia contida no movimento atómico das partículas, influencia o valor da viscosidade, obedecendo a expressões de tabelas profusamente disponíveis em múltiplos manuais gerais de hidráulica.

Em relação à viscosidade, um fluido pode se classificar como newtoniano (ou de viscosidade newtoniana), quando se verifique a presença de uma relação linear entre as tensões tangenciais aplicadas e a velocidade de deformação angular presente no fluido. Se esta relação não for linear, o fluido em causa dir-se-á não newtoniano (ou de viscosidade não newtoniana).

Para se ilustrar a relação entre tensões e deformações, realidade que se pretende quantificar como viscosidade de um determinado fluido, considere-se uma massa fluída em movimento, dispondo de dois elementos de superfície (também designados por facetas) paralelos, possuindo área dS e distantes entre si no valor de um infinitésimo dr segundo a norma comum, como representado na fig. 1.1. Aceite-se a hipótese da água localizada numa destas facetas se deslocar com uma velocidade $\vec{v}$, complanar com a faceta e, a outra, com velocidade $\vec{v} + d\vec{v}$, com a mesma direcção de trajectória que a anterior.

O gradiente de velocidades na normal comum às duas superfícies, numericamente igual à velocidade de deformação angular, será então dv/dr . Sir Isaac Newton verificou experimentalmente que o elemento mais rápido e o mais lento tendem

a se arrastarem de forma recíproca conjugada, com uma força tangencial dF , cuja intensidade é representada, no caso dos fluidos newtonianos, de maneira proporcional à área ds e ao gradiente de velocidades segundo a normal. Representando a equação estabelecida por esta descrição, obtemos (1.26),

$$dF = \mu \, ds \frac{dv}{dr} \quad (1.26)$$

em que μ representa o *coeficiente de viscosidade dinâmica*, também designado por *coeficiente de viscosidade absoluta*.

Se se pretender representar a formulação anterior, de forma relativa à tensão tangencial τ , então obtém-se (1.27).

$$\frac{dF}{ds} = \tau = \mu \frac{ds}{ds} \frac{dv}{dr} = \mu \frac{dv}{dr} \quad (1.27)$$

Conclui-se assim pela relação inversa, em que (1.28)

$$\mu = \tau \frac{dr}{dv} \quad (1.28)$$

o *coeficiente de viscosidade dinâmica*, μ , também designado por *coeficiente de viscosidade absoluta*, possui dimensões físicas representadas, no Sistema Internacional, por Ns/m^2 (isto é $[L^{-1} M T^{-1}]$).

A temperatura observa-se influenciar a viscosidade absoluta da água, pela fórmula empírica (1.29), observada por Poiseuille,

$$\mu(\text{centipoise}) = \frac{1,78}{1 + 0,0337 \, \theta + 0,000221 \, \theta^2} \quad (1.29)$$

relaciona-se θ (a temperatura, expressa em $^{\circ} \text{Celsius}$) com μ .

Frequentemente, em vez de μ , que depende da massa volúmica do fluido (o efeito da viscosidade é tanto mais significativo quanto mais elevada for a massa volúmica), considera-se um outro coeficiente de viscosidade, representado em (1.30),

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.30)$$

designado por *coeficiente de viscosidade cinemático*, ou *coeficiente de viscosidade relativo*. Este coeficiente é obtido pelo quociente da viscosidade total, pelo valor da massa específica. As dimensões da viscosidade cinemática no Sistema Internacional

são m^2/s , $[L^2 T^{-1}]$, não figurando portanto a massa do fluido na determinação desta medida.

A água, para efeitos práticos e obtidos por exemplo através da fórmula representada de Poiseuille (1.29) para 20°C , oferece valores de aproximadamente $1,009987 \times 10^{-6} \text{Ns}/\text{m}^2$ de viscosidade absoluta e de $1,011808 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ para a viscosidade cinemática.

O fenómeno da viscosidade evidencia-se predominantemente nos movimentos dotados de pequenas velocidades (mais adiante classificados como “*laminares*”). Nos escoamentos “*turbulentos*” (como adiante melhor se precisará este conceito), as tensões tangenciais viscosas manifestam-se de modo muito mais acentuado junto das paredes sólidas (numa camada de muito pequena espessura designada por “*camada limite*”), sendo as tensões tangenciais que se constataam fora desta zona essencialmente de natureza turbulenta.

Os fluidos “*perfeitos*”, ou “*ideais*” dizem respeito a abstracções teóricas de fluidos que, para além de serem homogéneos e isotrópicos, se apresentam sem condutibilidade calorífica e sem viscosidade. Na realidade, não existindo fluidos nestas condições, apenas podermos eventualmente encontrar situações em que o valor da viscosidade ou da condutibilidade calorífica se tornem desprezáveis, face a outras forças ou características presentes no escoamento. A ausência de condutibilidade de um fluido pode ser simulada, por exemplo, a partir de situações em que a temperatura do fluido seja homogénea.

A relação linear que define os fluidos perfeitos

$$\mu = \tau \frac{dr}{d\nu} \quad (1.31)$$

ou a sua inversa

$$\tau = \mu \frac{d\nu}{dr} \quad (1.32)$$

que caracteriza os fluidos de viscosidade newtoniana, representa, de forma suficientemente próxima, grande diversidade de líquidos e de gases. Mas esta relação não é universal.

Todavia, a água, o fluido que será objecto de desenvolvimento do presente trabalho de Dissertação, comporta-se como um fluido muito aproximadamente newtoniano, razão pela qual só essa relação será considerada para estudo no presente trabalho.

Ficam, neste sentido, totalmente excluídas nomeadamente relações reológicas de viscosidade plásticas, pseudo-plásticas com cedência e pseudo-plásticas. Estas relações estabelecem-se em função do andamento de um gráfico de relacionamento

entre a tensão tangencial aplicada ao fluido em classificação, com as velocidades de deformação observadas.

Coesão, Tensão Superficial e Adesão

Nos líquidos, as atrações entre moléculas determinam a existência de uma *força de coesão*, força que, considerando a escala a que se manifesta, evidencia apreciável valor, determinando a presença no líquido de uma resistência considerável a esforços de tracção.

Uma das manifestações que a coesão pode realizar encontra-se também presente no fenómeno da capilaridade. A existência da *coesão* indica que qualquer molécula de fluido se encontra constantemente submetida a importantes acções resultantes, por parte das moléculas vizinhas. Estas forças diminuem rapidamente de acção com a distância presente entre moléculas. Estas solicitações que se constituem por acções mútuas entre moléculas circundantes, tornam-se praticamente desprezáveis no exterior de uma esfera limite, hipoteticamente centrada na molécula – a “*esfera de actividade molecular*”.

Considerando a circunstância de um líquido colocado em contacto com uma fronteira constituída por um meio exterior gasoso, se toda a esfera de actividade significativa se situar no interior da massa do líquido, as acções que as outras moléculas situadas no interior da esfera exercem sobre aquela a que a referida esfera diz respeito, anulam-se, por acção de uma situação de equilíbrio. Mas, se a molécula se situa a uma distância da superfície livre inferior ao raio da referida esfera de actividade molecular, uma parte desta esfera situar-se-á no exterior do domínio líquido.

Sendo assim, a resultante das acções no interior da esfera, será não nula nas proximidades da superfície, existindo deste modo uma força que actua sobre as moléculas da fronteira, impelindo-as para o interior do líquido. Esta força será tanto mais intensa, quanto mais próxima a molécula se encontrar da superfície actuando mais significativamente sobre uma “*fatia*” superficial extremamente delgada do fluido.

Deste modo compreende-se que o fenómeno de evaporação (isto é a passagem do estado líquido ao estado gasoso), exija o fornecimento de energia suplementar ao sistema para se concretizar. Nesta explicação, também só com um fornecimento de trabalho suplementar poderemos fazer distender uma superfície livre de um líquido, no sentido desta superfície não oferecer uma configuração mínima de energia. Daí as manchas de óleo que flutuem em água oferecerem, tendencialmente, a configuração circular. E os planetas, sem a consideração de outras influências dinâmicas e gravitacionais de inter-interferência, a configuração esférica.

Este princípio de minimização da energia a que os fluidos no geral obedecem e que se manifesta por exemplo nos resultados da *coesão* e da *tensão superficial*, é utilizado em múltiplos outros aspectos da mecânica dos fluidos. Nomeadamente o equilíbrio

de redes de distribuição de água é alcançado numa configuração também de energia mínima, circunstância cujo conhecimento se constitui como um precioso auxiliar para o estabelecimento das condições de cálculo que podemos suplementarmente envolver para compreensão e desenvolvimento do modelo matemático respectivo. Todavia, esta questão particular será tratada em âmbito próprio da presente Dissertação.

A *tensão superficial* é quantificada pelo *coeficiente de tensão superficial* ζ , que representa a energia superficial por unidade de área. Esta medida tem as dimensões de uma força por unidade de comprimento e exprime-se no Sistema Internacional em N/m , $[M T^{-2}]$.

A *adesão* constitui-se como a manifestação da *tensão superficial*, na presença de paredes sólidas. A combinação das forças de *adesão* com as de *coesão* explica os fenómenos capilares.

Tensão de vapor de um líquido

A tensão do vapor, p_v , de um vapor é a pressão que ele exerce num volume determinado. Diz-se que um volume está saturado quando não pode conter mais vapor. Nestas circunstâncias o vapor diz-se saturante. A tensão do vapor correspondente é a tensão de saturação de vapor.

A pressão de um gás, ou vapor, que juntamente com outros ocupe um dado volume, é igual à pressão que exerceria se só ele ocupasse esse mesmo volume. A tensão da mistura de gases é igual à soma das tensões componentes de cada um dos tipos de vapor, entendidos isoladamente.

Na água, a tensão de saturação do vapor cresce com a temperatura, tornando-se igual à pressão atmosférica ao se atingir o ponto de ebulição. A altura máxima da coluna de líquido que, a uma dada temperatura, equilibra a pressão atmosférica, é igual à diferença entre a altura correspondente à pressão atmosférica e a altura correspondente à tensão do vapor à temperatura que for colocada em questão de análise.

Nos sistemas de distribuição de água, esta relação entre a tensão de vaporização e a temperatura é extremamente importante. Nomeadamente quando se analisam problemas de elevação de líquidos, dado o valor de sub-pressão a que o líquido possa ser sujeito numa estrutura elevatória não poder ser inferior à tensão de vapor do líquido, para a temperatura de fluido presente no escoamento. Sob pena da ocorrência de transitórios de cavitação, fenómenos extremamente nocivos, materialmente, à integridade das instalações.

Nos escoamentos de líquidos, nomeadamente quando as velocidades são suficientemente elevadas, a pressão pode variar de tal modo ao longo do tempo e ao longo das localizações, que podem ocorrer, em algum lugar ou momento, valores iguais à tensão de saturação. Esta situação implica ter-se, no ponto e no momento em causa, uma vaporização instantânea do fluido, com o respectivo aumento de volume ins-

tantâneo que lhe é associado. Se este aumento de volume implicar a diminuição de pressão, também instantaneamente, manifestando-se este outro fenómeno no imediato da sua ocorrência, então estaremos em presença do fenómeno de cavitação no seio do escoamento. Esta circunstância é altamente transitória e constitui-se como profundamente nociva para a manutenção de todos os materiais fronteira que contactem com a zona envolvida ou sejam atingidos pelas ondas de choque de elevada frequência que esta circunstância origina.

Solubilidade dos gases nos líquidos

A *solubilidade* de um gás num líquido é o estado pelo qual moléculas de um gás deambulam livremente, sem a existência de qualquer fronteira de separação, no seio de um líquido. Designa-se por *coeficiente de solubilidade*, o quociente entre o volume de gás dissolvido e o volume de líquido dissolvente, em condições de saturação. A solubilidade dos gases na água, essencialmente o líquido que se sublinha de se considerar no presente trabalho, é regida por duas leis, respectivamente devidas a Henry e a Dalton.

De acordo com a *Lei de Henry*, o coeficiente de solubilidade permanece constante, a temperatura constante. Se se verificar um acréscimo de pressão, como de acordo com as Leis da Termodinâmica, o volume de gás dissolvido diminui, há a possibilidade de dissolução de uma quantidade adicional de gás; se a pressão diminuir, terá de se libertar uma certa quantidade de gás.

Como corolário desta lei, em pontos altos de condutas, deste modo sujeitas a menores valores de pressão, poder-se-à libertar e acumular este gás dissolvido, traduzindo-se esta situação em formas transitórias de funcionamento, potencialmente gravosas para a estabilidade estrutural das redes. Mas se considerar-mos a possibilidade de introdução de ar para o interior das condutas, por efeitos tipo Venturi ou mesmo de simples introdução nas circunstâncias de reparação de avarias, então poderemos encontrar uma quantidade de gás livre ainda maior do que aquele que se esperaria, apenas pela contribuição do fenómeno indicado de dissolução. Dado que eventualmente a emulsão em causa poderá oferecer estados diferentes, função nomeadamente das pressão locais observadas ao longo do trajecto do escoamento nas condutas, exige-se um cuidado acrescido sobre este fenómeno, que normalmente se traduz pela disposição de estruturas de purga do ar das redes, localizadas em pontos altos.

A *Lei de Dalton* estabelece que cada gás individual, na presença de uma mistura de gases dissolvidos, se comporta como se fosse o único gás que se encontrasse em dissolução no líquido. Uma consequência importante da *Lei de Dalton* provém do facto do “ar” dissolvido na água conter, em termos relativos, mais oxigénio que o ar atmosférico, dado o coeficiente de solubilidade do oxigénio gasoso na água ser duplo do relativo ao azoto. Como consequência, se ocorrer a des-dissolução de gás

da água, por exemplo, pelo aumento da temperatura ou diminuição de pressão, a mistura de gás que se liberta é bastante mais rica em oxigénio que o ar atmosférico, encontrando-se presente, por isso, maior potencial de oxidação.

Velocidade de propagação das ondas elásticas

A *velocidade de propagação das ondas elásticas* é a velocidade de propagação de uma variação de pressão no líquido. O seu valor iguala a raiz quadrada da elasticidade cinemática, η , representada em (1.33).

$$\psi = \sqrt{\eta} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}} \quad (1.33)$$

Verifica-se, deste modo, que esta característica se encontra ligada à compressibilidade do fluido, constituindo-se como uma sua propriedade intrínseca.

A velocidade de propagação das ondas elásticas é também muitas vezes designada por velocidade de propagação do som no fluido, por coincidir com esta característica. Esta velocidade apresenta para o ar e em condições normais de pressão e de temperatura, o valor de cerca de 340 m/s , oferecendo para a água à temperatura de 10°C e pressão atmosférica, o valor de 1.425 m/s .

Esta característica dos fluidos pode possuir interesse de desenvolvimento na presente Dissertação, ao permitir o estabelecimento de equações adicionais para integração de escoamentos transitórios no estudo do funcionamento de redes de distribuição de água. No entanto esta questão será de abordagem complexa, dado a integração destas equações adicionais exigirem, correspondentemente a integração de incógnitas adicionais, como seja o módulo de elasticidade das condutas.

Os valores relativos a esta característica podem ser objecto de determinação ou calibração inicial, acrescentando equações adicionais ao problema em estudo.

Difusibilidade

Difusibilidade é a característica de progressão, na água, de moléculas que se encontrem dissolvidas no seu seio. A difusibilidade possui dimensionalmente as características de uma velocidade.

Decaimento

O *decaimento* considera-se ser a evolução de concentração que se observe sobre um determinado produto solvido na água.

O decaimento, em modelos matemáticos de redes de abastecimento de água, é normalmente associado a uma equação diferencial de primeira ordem, do tipo

$$\frac{dc}{dt} = -kC \quad (1.34)$$

onde C é a concentração (normalmente expressa em mg/L), t o tempo e k uma constante de primeira ordem, designada por *constante de decaimento*.

A integração desta equação (1.34), segundo condições fronteira conhecidas, obtém (1.35) e (1.36).

$$\int_{c=C_0}^C dc = \int_{t=0}^t -kC dt \quad (1.35)$$

$$-\frac{1}{k} \int_{c=C_0}^C \frac{1}{C} dc = \int_{t=t_0}^t dt \quad (1.36)$$

Destas equações, (1.35) e (1.36), determina-se (1.37).

$$C = C_0 \times e^{-k(t-t_0)} \quad (1.37)$$

Esta última formulação (1.37), relaciona a medida de variação da concentração na água, em relação ao tempo.

A análise do fenómeno do decaimento aplicada ao interior de tubagens é normalmente separada em dois locais de abordagem. Estas localizações são classificadas como decaimento de parede (*wall decay*) e decaimento central (*bulk decay*)².

Cada um destes dois tipos de decaimento, que se poderá designar através dos correspondentes coeficientes k_p e k_c , respectivamente de decaimento de parede e decaimento central, possuem características que os tornam diferentes entre si, para uma mesma tubagem e simultâneas condições de escoamento. O inter-relacionamento entre estes dois factores é todavia simplificado normalmente ao valor de uma soma [183].

Características gerais dos escoamentos

Escoamento é o conceito que implica a observação de um conjunto de características dos fluidos, enquanto massas colocadas em movimento. Em termos gerais, o fenómeno do escoamento fluido é um assunto tratado pela dinâmica dos fluidos e

²Entre parêntesis a designação sobre esta matéria inerente à terminologia bibliográfica em língua inglesa.

que possui abordagem própria.

Os escoamentos são normalmente agrupados como *exteriores* e *interiores*. Os escoamentos interiores podem ainda ser classificados como *com superfície livre* ou *sob pressão*.

Os escoamentos interiores são caracterizados pelo fluido se deslocar de forma total ou parcialmente envolvido por fronteiras sólidas. Nos escoamentos exteriores é o fluido em movimento que envolve as paredes sólidas que se estabelecem como limites do escoamento.

Os escoamentos sob pressão verificam-se no interior de condutas, ocupando, neste caso, o fluido a totalidade interior da secção. O escoamento, quando classificável sob a forma de *sob pressão*, pode possuir contacto com o meio exterior. Porém esse contacto terá de ser de qualquer forma limitado, devendo ser abordado como orifício. De qualquer forma a influência de orifícios no escoamento será sempre reduzida, observando-se que a pressão que o fluido possa exercer sobre as paredes das condutas seja em geral diferente do observado pela acção da pressão atmosférica circundante.

O escoamento dir-se-á em superfície livre quando, podendo ser considerado como interior, comporta em simultâneo ao contacto com as fronteiras sólidas, uma outra fronteira, livre, a partir da qual o escoamento contacta de forma não restrita com um meio exterior, normalmente gasoso e em que basicamente se pode considerar oferecendo-se como não constrangedor da trajectória, ou sequer do estado, do fluido de que analisamos escoamento.

Para o estudo que se desenvolve, importarão essencialmente os escoamentos interiores sob pressão, em detrimento completo de todos os demais.

Escoamentos interiores

Os escoamentos interiores podem ser classificados como *não permanentes*, *permanentes variados* ou *permanentes uniformes*. As características capazes de suscitar a distinção entre estas três classificações de escoamento dizem normalmente, respeito a valores médios locais, dado que a generalidade dos nossos objectos de estudo se processará sob formas grandemente turbulentas.

A circunstância referida implica que os valores característicos de um determinado escoamento nestas condições, como a velocidade, a aceleração, a pressão e outras medidas locais, possuam não só valores escalares variáveis, ao longo do tempo, como também oscilações significativas do ponto de vista da orientação vectorial, de cada uma das suas componentes unitárias, dotada de expressão tridimensional, portanto.

Regime uniforme

O *regime uniforme* diz respeito aos escoamentos sob pressão, quando a secção do tubo é constante e quando o valor do caudal não varia de algum modo ao longo do tempo e do espaço. A existência de um regime uniforme não é colocada em

causa, mesmo que existam variações de caudal ou de secção em pontos isolados. Neste caso, todavia, terá de se considerar que estes pontos normalmente significam a presença de troços de transição que, para o caso de secções circulares, normalmente se consideram não excederem valores próximos de 50 vezes os diâmetros de conduta.

Em termos práticos, o regime não uniforme que normalmente se constata associado a extremidades de tubagens, por exemplo, é integrado num regime uniforme médio, que pouco difere do anterior, dentro de uma análise que envolve uma integração sobre a totalidade do escoamento estendido à totalidade da conduta. Este caso é muito particularmente aplicável para simplificar a abordagem de redes de distribuição de água.

Nos escoamentos com superfície livre, da não constrição do escoamento deriva uma muito maior dificuldade na ocorrência do regime uniforme. De facto, mesmo que se garanta a uniformidade da forma da secção e do caudal, múltiplos outros factores, locais ou globais do escoamento, o poderão influenciar de forma suficiente para o afastar significativamente das características próximas daquilo que se classificou anteriormente como regime uniforme de escoamento.

Regime permanente variado

O regime *permanente variado* tanto pode resultar:

a) da variação da secção do escoamento ao longo do percurso, conservando-se o caudal constante,

$$\begin{cases} S = S(s); \\ Q = \text{constante}, \end{cases}$$

como de; b) da variação do caudal com secção constante

$$\begin{cases} S = \text{constante}; \\ Q = Q(s), \end{cases}$$

ou de; c) da variação simultânea de secção e de caudal

$$\begin{cases} S = S(s); \\ Q = Q(s). \end{cases}$$

Este escoamento acontece, sempre, com variáveis expressas de forma independente da variável tempo, sendo s uma variável que diga respeito a uma dimensão linear de índole significativa do escoamento, normalmente o comprimento longitudinal do escoamento (canal, tubagem, etc.).

Regime não permanente variado

Basicamente, o regime *não permanente* ocorre como consequência das três situações anteriormente referidas para o escoamento permanente variado, mas de forma que sejam dependentes da variável tempo. Isto é:

- a) Secção variável no tempo e caudal constante:

$$\begin{cases} S = S(t); \\ Q = \text{constante}. \end{cases}$$

- b) Secção constante e caudal variável no tempo:

$$\begin{cases} S = \text{constante}; \\ Q = Q(t). \end{cases}$$

- c) Secção e caudal variáveis no tempo

$$\begin{cases} S = S(t); \\ Q = Q(t). \end{cases}$$

e de forma que seja independente da possibilidade de variação das grandezas com a dimensão de percurso, s , anteriormente referenciada.

Para o estudo das redes de distribuição de água, matéria que seguidamente se aprofundará, o conjunto de regimes que nos interessará de considerar mais propriamente para desenvolvimento, dentro do conjunto geral apresentado, será:

- i) Regimes uniformes: Todas as situações.
- ii) Regimes permanentes variados: Escoamentos com variação do caudal, função do percurso.
- iii) Regimes não permanentes: Escoamentos que apresentem variação de características (como o caudal ou a pressão), função transitória do tempo.

Este conjunto de regimes hidráulicos, obedecendo a explicações físicas e teóricas que são independentes entre si, podem oferecer formas adicionais de contribuição integrada para o sentido de obtenção de resultados de análise de redes de distribuição de água que possam resultar mais determinadas. O movimento da água, para o presente desenvolvimento, será considerado no interior de tubagens fechadas, de secção circular, sendo o escoamento sob pressão e oferecendo a água todas as características esperadas de um fluido pesado e incompressível.

Varáveis a considerar na Mecânica dos Fluidos

A resolução de qualquer problema de mecânica dos fluidos resulta da possibilidade de conhecimento, em cada ponto do domínio fluido e em cada instante, dos nove elementos do tensor das tensões, dos nove elementos do tensor das velocidades de deformação, das três componentes do vector velocidade, bem como da massa volúmica e da temperatura. Este conjunto resulta num total de 23 parâmetros.

Importa, todavia, realizarmos simplificações e, da totalidade de elementos nomeados, bastará conhecer os 6 seguintes:

1. a pressão em cada ponto, P , do domínio ocupado pelo fluido e em cada instante, t ;

$$p = p(P, t);$$

2. a massa volúmica, ρ , em cada ponto e em cada instante;

$$\rho = \rho(P, t);$$

3. a temperatura T , que também poderá ser função do ponto e do tempo;

$$T = T(P, t);$$

4. os três componentes do vector velocidade.

Para obtenção destas variáveis aplicadas a redes de distribuição de água, aplicar-se-ão as leis de continuidade de massa nos nós e a determinação unívoca de relacionamento entre caudais e perdas de carga, em tubagens, como abordado seguidamente.

1.2.2 Equações da Mecânica dos Fluidos – Equações globais

As configurações materiais das redes, principalmente por questões comerciais, mas também por questões de índole técnica, organizam-se sob sequência de séries e formas normalizadas. Aqui se englobam os aspectos de diâmetro, comprimento de tubagens, interligação e respectivos tipos, acessórios e respectiva colocação na rede, etc. Esta situação quer-se contudo que não interfira com o tipo de desenvolvimento que se pretende realizar na presente dissertação, que pretende abarcar uma generalidade de objectivos que permitam, razoavelmente, a compreensão do fenómeno de modelação e calibração de redes de distribuição de água que se pretende estudar e desenvolver.

Escoamento em condutas

Quando um líquido escoar numa conduta, desenvolve-se uma tensão superficial ao longo das paredes entre a superfície de contenção e o seio fluido em movimento.

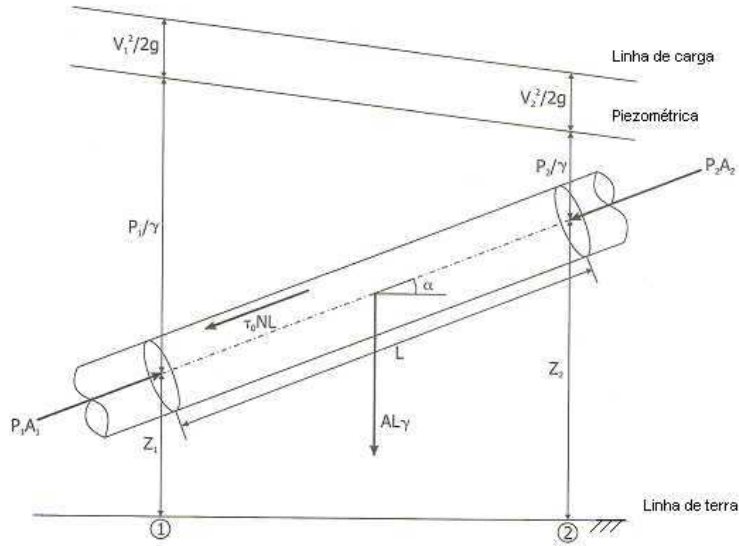


Figura 1.2: representação de forças num escoamento.

Este estado de tensão resulta de efeitos de atrito que ocorrem no seio da água e entre a água e as paredes da conduta, conduzindo a situação, por efeitos dinâmicos de turbulência e pelas características do fluido e da parede, à perda de energia do escoamento.

A equação geral de equilíbrio de forças que podemos associar a este sistema é, como evidenciado pela fig. 1.2:

1. A diferença de pressões entre as secções 1 e 2;
2. O peso do fluido contido entre secções;
3. O esforço transversal resultante ao nível das paredes entre secções.

Numa situação em que pudéssemos supor um escoamento permanente uniforme não variado, este sistema poderá obter equilíbrio com base na consideração das diferenças de pressão entre secções, o esforço de corte e o peso da massa de fluido em análise. Isto é que:

$$P_1 A_1 - P_2 A_2 - \tilde{A} L \gamma \sin(\alpha) - \tau_0 N L = 0 \quad (1.38)$$

em que:

- i) P_1 e P_2 , representam a pressão nas secções 1 e 2, respectivamente $[N/m^2]$;

- ii) A_1 e A_2 representam a área transversal das secções 1 e 2, respectivamente $[m^2]$;
- iii) $\tilde{A}$, representa a média de área transversal das secções 1 e 2, respectivamente $[m^2]$;
- iv) L , representa a distância entre secções $[m]$;
- v) γ , representa o peso específico do fluido $[N/m^3]$;
- vi) α representa o ângulo da tubagem com a horizontal $[s/dim.]$;
- vii) τ_0 representa o esforço transversal desenvolvido ao longo da parede $[N]$, e, por fim;
- viii) L representa o perímetro da secção $[m]$.

Nesta equação (1.38), $\tau_0 NL$, representa as perdas de energia ao longo do tubo ocorridas entre secções. Geometricamente reconhece-se que $\sin(\alpha) = (Z_2 - Z_1)/L$, e considerando a necessidade do o movimento ter de ser classificado como escoamento permanente uniforme e não variado, as secções da tubagem necessitam de se oferecer em progressão cilíndrica, de secção constante. Só deste modo se obteria um sistema que fosse isento de variações de velocidade ao longo do comprimento de L e, portanto, que não fosse interferido por outras forças de aceleração/reacção, adicionais às anteriormente consideradas para o sistema.

Nestas condições, a equação identificada em (1.38), pode se representar pela seguinte outra equação equivalente:

$$h_L = \tau_0 \frac{NL}{\gamma \tilde{A}} = \left(\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \right) \quad (1.39)$$

onde:

- i) h_L , representa a perda de carga relativa a efeitos de fricção e;
- ii) Z_1 e Z_2 , representam a cota do centro de gravidade das secções 1 e 2, respectivamente.

A lei de Newton da viscosidade permite a determinação do esforço de corte supra utilizado para regimes laminares, nomeadamente ao relacionar velocidades de deslizamento relativo entre facetas, o esforço de corte observado e a viscosidade fluida.

Para regimes turbulentos mais gerais é possível deste desenvolvimento extrair o seguinte relacionamento dimensional de variáveis:

$$\tau_0 = F(\rho, \mu, U, D, k) \quad (1.40)$$

em que:

- i) ρ , representa a massa específica;
- ii) μ , representa a viscosidade absoluta;
- iii) U , representa a velocidade média do escoamento;
- iv) D , representa o diâmetro da conduta e;
- v) k , representa a rugosidade da conduta.

A operacionalidade deste último relacionamento pode ser efectuada por recurso a várias abordagens, nomeadamente as propostas por Darcy-Weisbach, decorrente de uma análise dimensional, ou, também, por formulações mais sensitivas, empíricas, do tipo do proposto por Hazen-Williams, Manning, ou outras.

Fórmula de Darcy-Weisbach.

Por relacionamento dimensional, é possível desenvolver a equação anterior (1.40), de forma assimilável à fórmula (1.41), também designada por fórmula de Darcy-Weisbach.

$$J = \frac{\Delta H}{L} = \frac{\lambda}{D} \times \frac{U^2}{2g} \quad (1.41)$$

em que:

- i) J , representa a perda de carga unitária $[L/L]$;
- ii) ΔH , a perda de carga total $[L]$;
- iii) L , o comprimento da tubagem $[L]$;
- iv) λ , o coeficiente de resistência $[adimensional]$;
- v) D , o diâmetro $[L]$;
- vi) U , a velocidade na conduta $[L T^{-1}]$, e;
- vii) g , a aceleração da gravidade $[L T^{-2}]$.

No Sistema Internacional, as dimensões $[L]$ expressam-se em metros, as $[L T^{-1}]$ em metros por segundo e as $[L T^{-2}]$ em metros por segundo por segundo.

A igualdade anterior (1.41), relaciona perdas de carga e velocidade de escoamento, resultando na determinação das perdas de carga contínuas observadas em escoamentos de água em condutas.

O coeficiente de resistência λ , incluído, será função do número de Reynolds (Re) do escoamento e da rugosidade da tubagem. Se se considerar a rugosidade como podendo ser representada apenas por um só parâmetro, k , então o coeficiente de resistência poderá ser representado pela função:

$$\lambda = \lambda\left(Re, \frac{k}{D}\right) \quad (1.42)$$

sendo esta uma forma dimensional onde se resume que o coeficiente de resistência (λ) é função directa do número de Reynolds (Re) e da rugosidade (k), bem como inversa do diâmetro (D) da tubagem. Para os efeitos da determinação deste relacionamento a tubagens circulares (e restantes condicionantes presentes nas redes de distribuição de água), considerar-se-á que:

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (1.43)$$

Na formulação do adimensional contido em (1.43), ν , em denominador, representará a viscosidade cinemática da água, já anteriormente definida por (1.30), e UD , em numerador, respectivamente a velocidade média do escoamento e o diâmetro da tubagem.

O relacionamento sobre o qual se possa determinar as perdas de carga de água em movimento no interior de condutas comerciais, desenvolve-se a partir das experiências realizadas por Nikuradse (Novais-Barbosa, 1985, [166]).

Nikuradse, fundamentado nos desenvolvimentos representados para a obtenção da fórmula de Darcy-Weisbach, (1.41), observa a presença de um relacionamento entre o factor de resistência e um conjunto seleccionado de diversas rugosidades artificiais, sendo este o objecto da sua investigação. As rugosidades utilizadas corresponderam à disposição, sobre uma superfície lisa de vidro, de protuberâncias como pequenos cubos ou paralelepípedos dispersos, pirâmides, esferas, ou outras.

A rugosidade, deste modo, pode ser aferida apenas a um só parâmetro, simplificando-se e reduzindo-se a análise do fenómeno a uma abordagem simples e prática. As características do escoamento ficam reduzidas ao parâmetro k , de rugosidade, e a D , de diâmetro da tubagem, ambas com a dimensão de um comprimento.

A viscosidade da água e a velocidade do escoamento determinam assim o outro parâmetro de dinâmica do escoamento, o número de Reynolds. Desta investigação de Nikuradse resultou um quadro de resultados agregado, disponível em Novais-Barbosa (1985), [166].

Resultados da experiência de Nikuradse

Da análise do comportamento de um dado tubo, ou de tubos dotados de uma dada rugosidade relativa, k/D , resultam o seguinte conjunto de constatações:

- i) Para pequenos valores de número de Reynolds do escoamento, isto é até Re próximo de 2.000, observa-se a existência de uma relação linear entre $\log_{10}(\lambda)$ e $\log_{10}(Re)$, que se traduz no gráfico num trecho rectilíneo de coeficiente angular igual a -1 . Este troço do gráfico corresponderá ao regime laminar do escoamento. Segue-se uma zona que se constata ser respeitante a uma transição entre o regime laminar e o regime turbulento, referenciados;
- ii) Para a determinação do parâmetro λ indicado na fórmula de Darcy-Weisbach anteriormente apresentada em (1.41), considera-se que a melhor função que representa a relação entre o coeficiente de resistência e as condicionantes indicadas do escoamento, é a fórmula de Colebrook-White. Esta fórmula possui a expressão (1.44).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\frac{k}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (1.44)$$

As notações utilizadas possuem os significados já anteriormente apontados para a fórmula de Darcy-Weisbach, (1.41), e número de Reynolds, (1.43).

A formulação de Colebrook-White, (1.44), para redes de distribuição de água abrange um leque multivalente de regimes de escoamento. Enquadram-se nela, com propriedade, desde regimes laminares lisos, de baixas velocidades, até turbulentos rugosos, de velocidades bastante mais elevadas, em termos relativos.

Fórmula de Hazen-Williams.

A abordagem de Hazen-Williams corresponde à aplicação da fórmula empírica:

$$h_L = \frac{10,7 \times L}{C^{1,852} \times D^{4,87}} \times Q^{1,852} \quad (1.45)$$

em que:

- h_L representa a perda de carga relativa à fricção (em *mca*);
- L , a distância entre secções em análise (em *metros*);
- C , o coeficiente de Hazen-Williams;
- D , o diâmetro da conduta (em *metros*) e;
- Q , o caudal a percorrer a tubagem (em m^3/s);

A formulação apresentada, por a dedução ser empírica, necessita de ser aferida às unidades indicadas para cada uma das variáveis envolvidas. O coeficiente C , de Hazen-Williams, representa uma capacidade de transporte da tubagem, diminuindo a perda de carga à medida que este valor aumente.

1.2.3 Considerações sobre as formulações disponíveis para cálculo de perdas de carga em condutas

Não se considerará relevante, para o âmbito do presente desenvolvimento, as críticas que possam ser formuladas à validade das fórmulas de resistência e respectivas abordagens de relacionamento entre variáveis. E quer sobre as formulações apresentadas, ou sobre outras, porquanto este tipo de questão oferecer-se-á como não fundamental, face ao âmbito e matérias que se pretende analisar e desenvolver na presente Dissertação.

Aliás, no fundo, a abordagem de cálculo que se proporá para obtenção dos objectivos que se pretendem alcançar, recorrendo à biblioteca externas de funções do modelador matemático de redes de distribuição de água EPANET, utilizará as mesmas formulações e o mesmo método iterativo de resolução do sistema, para determinação das redes. Quer na perspectiva do protótipo simulado, quer da abordagem propriamente dita do modelo proposto de calibração.

Esta circunstância indicada, só por si, inviabiliza qualquer observação que eventualmente se pudesse dispor numa análise realizada sobre uma rede real, no sentido de encontrar eventuais discrepâncias entre as fórmulas e a abordagem de relacionamento de sistema matemático, com o modelo real.

1.2.4 Resolução de redes de abastecimento de água.

Relativamente às equações gerais da mecânica dos fluidos, já apresentadas de forma sumária na página 26, o conhecimento do sistema exigiria a possibilidade de determinação de 6 parâmetros por ponto geométrico extensivo de volume. Três destes parâmetros constituem o vector de velocidade, outros dois, a massa volúmica e a temperatura, e, por último, a pressão.

Porém, para o que nos interessa, uma rede de tubagens (e outros elementos hidráulicos de distribuição de água – válvulas, bombas e reservatórios) será considerada resolvida quando as pressões e consumos em todos os nós da rede puderem ser conhecidos (Shamir e Howard, 1968, [212]). Significa esta circunstância que, para nesta perspectiva podermos considerar completamente conhecidos, os sistemas de distribuição de água limitam-se à determinação de dois parâmetros por nó.

Para a obtenção destas variáveis envolvidas na determinação das redes, aplicam-se as leis de continuidade de massa nos nós e a determinação unívoca de relacionamento entre caudais e perdas de carga, em tubagens.

Estes relacionamentos expressam-se num gradiente de pressões, que possui sentido negativo relativamente à origem dos escoamentos, sendo este sistema observado como um sistema de dissipação de energia, obedecendo a todas as leis da sua conservação pela natureza.

A abordagem que resulta desta perspectiva, já se observou não ser linear (fórmulas aplicáveis (1.44) ou (1.45), ou outras equivalentes). Em termos gerais, não existe linearidade de relacionamento entre a perda de carga hidráulica em condutas e o respectivo caudal.

Apesar destas dificuldades, a resolução de redes de distribuição de água pode ser realizada segundo a metodologia seguidamente desenvolvida, na perspectiva do método dos nós. Esta abordagem é utilizada, por se considerar ser este, em detrimento de outros, nomeadamente do método das malhas, o mais didático para a compreensão do problema. No entanto o método das malhas possuirá o mesmo desenvolvimento formal, apenas sendo relativo ao equilíbrio de pressões ao longo das malhas e não da continuidade de caudal nos nós, como é o caso do método que seguidamente se fará desenvolvimento.

Outra possibilidade envolvida para este desiderato de compreensão poderia ser representada por metodologias de gradiente, sistemas que determinam a rede ao encontrarem a energia mínima envolvida no seu escoamento, que é o caso utilizado pelo modelador EPANET para resolução de redes de distribuição de água.

Método dos nós. Nós de condutas

Para a resolução do problema de equilíbrio de caudais num determinado nó, como ilustrado pela fig. 1.3, supõem-se que n condutas confluem a um determinado nó N , onde se supõe também serem conhecidos os elementos topológicos de comprimentos, diâmetros, rugosidades e demais parâmetros que implicam na formulação hidráulica do problema, como os consumos, bem como a geometria topológica de ligação da rede. Isto é, são conhecidos $[L_1 \text{ a } L_n]$; $[D_1 \text{ a } D_n]$ e $[h_1 \text{ a } h_n]$, respeitando este conjunto de incógnitas respectivamente a comprimentos, diâmetros de tubos e pressão nos nós.

No nosso caso mais simples de um só nó, importa determinar h_N , e Q_e^N , que representa o conjunto incógnita. Supõe-se que o problema se desenvolve em regime permanente, isto é, que não existem alterações ao longo do tempo da piezométrica nos nós, nem de caudais nas tubagens, encontrando-se o regime hidráulico completamente estabelecido.

Nesta situação, a perda de carga total entre os nós conhecidos de uma rede de distribuição ($\{i \in I = [1, n]\}$, onde se inclui o próprio nó N) pode ser expressa por:

$$\Delta H_i = |h_i - h_N| \quad (1.46)$$

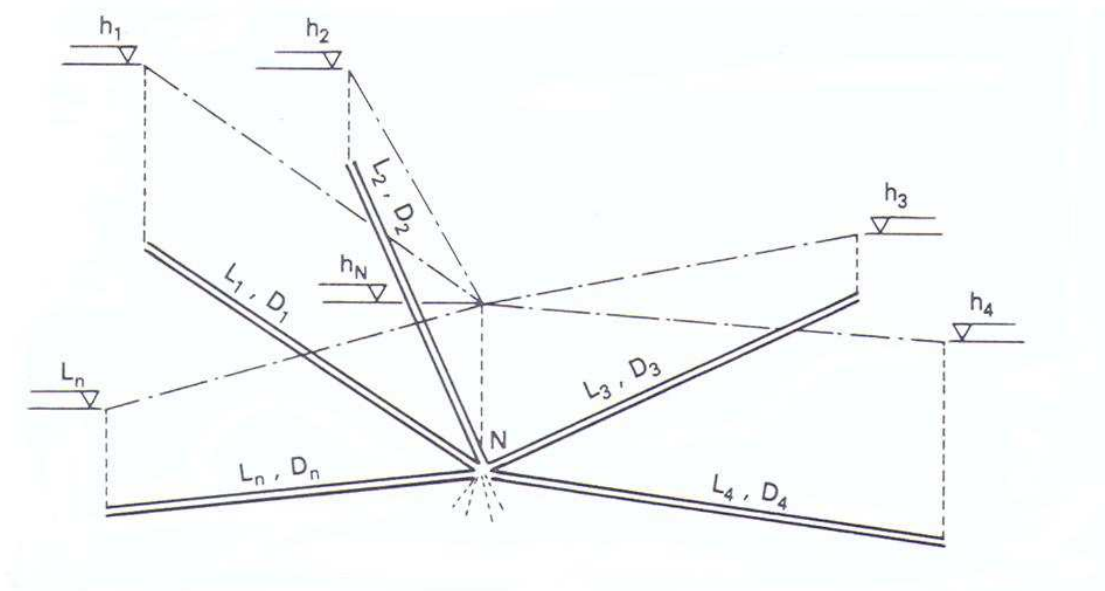


Figura 1.3: (Novais-Barbosa(1985)), [167].

Dado que o caudal em cada conduta pode ser relacionado com a perda de carga através de uma equação do tipo da contida na fórmula de Darcy-Weisbach (1.41), e tratando-se, convenientemente, esta relação de forma integrada na equação (1.46) anterior, obtém-se o termo geral de rede:

$$|h_i - h_N| = \frac{8\lambda_i L_i Q_i^2}{g\pi^2 D_i^5} + \frac{8K_i Q_i^2}{g\pi^2 D_i^4} \quad (1.47)$$

em que o segundo membro da parte direita da equação (1.47) representa perdas de carga localizadas e o i varia de 1 a n (tubos presentes no sistema de distribuição). O valor de h_N representa a incógnita que se busca, devendo a este conjunto de equações se acrescentar uma equação que traduza a própria continuidade no nó, a qual normalmente se escreve sob a forma:

$$\sum_{i=1}^n (Q_i) = Q_e^N \quad (1.48)$$

Pode convencionar-se nesta equação, por exemplo, que Q_i será positivo quando o caudal seja afluente ao nó, e negativo em situação contrária e que a convenção de sinais sobre Q_e^N (caudal exterior de entrada ou saída no nó) corresponde a que seja positivo quando efectua extracção de água da rede, e negativo em situação inversa.

Este sistema de equações constitui-se como um sistema de $n + 1$ equações a $n + 1$ incógnitas (isto é de 1 a n caudais nos tubos, mais a própria incógnita de piezometria que se busca h_N). As equações que relacionam os caudais com as perdas de energia já anteriormente se referenciam como sendo não lineares e corresponderem a (1.44)

ou (1.45), por exemplo.

A resolução deste problema para um determinado nó pode ser conseguido a partir da formulação seguinte sistematizada (Novais Barbosa, 1985) [167]:

- Arbitra-se a cota piezométrica, h_N , do designado nó N ;
- Calculam-se os caudais correspondentes às linhas piezométricas que se produziram nas n condutas aferentes, através de uma fórmula de resistência do tipo apresentada (por exemplo a conjugação de Darcy-Weisbach (1.41) com Colebrook-White (1.44), ou outras quaisquer aplicáveis, como (1.45));
- Verifica-se se os caudais encontrados satisfazem a equação de continuidade no nó, de acordo com uma tolerância previamente fixada;
- Dada a convenção de sinal, aplicada a Q_i , se se constatar um excesso de caudal que tenha de ser retirado do nó N , então dever-se-á subir o arbítrio de piezometria, devendo-se diminuir esse mesmo arbítrio se se constatar uma deficiência de caudal que tenha de ser colocada externamente sobre o nó N ;
- E o processo repete-se até se alcançar um pressuposto de continuidade que seja satisfeito com grau determinado de aproximação, obtendo-se deste modo o resultado pretendido para pressões e caudais do sistema.

Redes de condutas

No caso da presença de uma rede de condutas dotada de n nós e um total de t tubos ligados entre si, os desenvolvimentos que até agora foram realizados para a situação de um nó individual, ligado a um feixe de condutas, são generalizáveis.

Para a análise que se realizará neste trabalho, entender-se-á por *rede de distribuição de água* o sistema de condutas envolvendo vários nós ligados por tubagens e onde os trechos de tubos em série ou em paralelo que se encontrem ligados ao mesmo par de nós, são transformados numa tubagem resultante, de forma que, esta outra, seja hidraulicamente equivalente à estrutura hidráulica que se observe presente no sistema em análise.

Se se identificar cada uma das tubagens a partir de uma notação relativa aos nós que se encontrem colocados na extremidade, então pode-se, considerando aplicável a formulação de Darcy-Weisbach (1.41), garantir a validade da equação (1.49).

$$h_i - h_j = \frac{8\lambda_{ij}L_{ij}}{g\pi^2 D_{ij}^5} \times |Q_{ij}| Q_{ij} + \frac{8K_{ij}}{g\pi^2 D_{ij}^4} \times |Q_{ij}| Q_{ij} \quad (1.49)$$

Nesta equação, os h 's representam as n cotas piezométricas do nosso sistema em equação. O par de índices ij apostos às variáveis da equação representa serem

relativas à ligação entre os nós i e j , convencionando-se positivos os caudais que digam respeito a um fluxo de direcção de i para j .

O primeiro membro da parte direita desta igualdade (1.49), diz respeito às perdas de carga lineares ao longo das condutas de ligação entre nós. O segundo membro diz respeito à contribuição de perdas de carga localizadas que se observem na conduta, função do escoamento observado.

Quando na equação (1.49) i for igual a j , isto é, quando se referir à perda de carga entre o mesmo nó da rede, os dois numeradores desta fórmula obtêm estruturalmente o óbvio valor nulo.

Nesta equação (1.49), e relativamente a (1.47), o quadrado do caudal é substituído pelo produto entre o módulo e o valor do caudal, no sentido de se fazer transmitir entre ambos os lados da igualdade a notação de sinais convencionada para sentido de caudal presente no escoamento.

Para os desenvolvimentos seguintes, e considerando não interessar para o âmbito da matéria em estudo a contribuição de perdas de carga localizadas, nomeadamente presentes na junção de caudais dos próprios nós (estudados de forma extensiva por Idelchik), ou em dispositivos da rede, passar-se-á a desprezar a contribuição que é contida por esta parcela correspondente na equação apresentada. O mesmo se aplica a ganhos de energia operados por dispositivos de bombagem.

Considera-se que esta limitação de abordagem não penaliza o essencial da compreensão da matéria que se envolve, nem retirará generalidade de abordagem. Porquanto, a qualquer momento e sempre que isso se revelar necessário, os termos desta forma retirados podem simplesmente ser somados às conclusões que se extraírem sobre os fenómenos físicos em estudo, obtidas sem a consideração dos fenómenos referidos de variações localizadas (positivas ou negativas) de energia dos escoamentos das redes de distribuição.

O desenvolvimento da equação de síntese geral enunciada anteriormente para a perda de carga da tubagem que liga os nós i e j de uma rede de distribuição de água, onde se contêm as t equações independentes de caudal e perda de carga para os t tubos presentes na rede, e incluindo a equação da continuidade de cada nó, pode ser apresentado através do sistema seguinte, constituído pelas equações (1.51) e (1.52), considerando (1.50).

$$\frac{1}{C_{ij}} = \frac{8\lambda_{ij}L_{ij}}{g\pi^2 D_{ij}^5} \quad (1.50)$$

$$h_i - h_j = \frac{1}{C_{ij}} \times |Q_{ij}| Q_{ij} \quad (1.51)$$

$$\left(\sum_{i=1}^n Q_{ij} \right) = Q_{ej} \quad (1.52)$$

Nestas equações, C_{ij} só possuirá definição física se o tubo de ligação entre os nós i e j existir, representando Q_{ej} o caudal externo presente no nó j . Este caudal externo, por convenção, é positivo se retirado para o exterior da rede, e negativo se, contrariamente, for injectado para o seu interior.

Se se transformar C_{ij} em b_{ij} segundo a relação representada em (1.53)

$$b_{ij} = \frac{C_{ij}}{|Q_{ij}|} \quad (1.53)$$

em que $b_{ij} = 0$, se o tubo ij não existir, ou se o caudal for nulo, então (1.51) transforma-se na equação (1.54).

$$Q_{ij} = b_{ij}(h_i - h_j) \quad (1.54)$$

Se se considerar adicionalmente a equação da continuidade de cada nó j da rede, obtém-se finalmente (1.55).

$$\sum_{i,j=1}^n (b_{ij}(h_i - h_j)) = Q_{ej} \quad (1.55)$$

Esta formulação (1.55) representa a forma condensada de um sistema de n equações a n incógnitas, incógnitas constituídas pelas pressões em cada um dos n nós presentes no sistema de distribuição de água que se analisa. Expandindo-se estas equações, obtém-se o outro sistema equivalente (1.56),

$$b_{1j}(h_1 - h_j) + b_{2j}(h_2 - h_j) + \dots + b_{jj}(h_j - h_j) + \dots + b_{nj}(h_n - h_j) = Q_{ej} \quad (1.56)$$

com j a decorrer de 1 até n .

Expandindo ainda mais e agrupando os termos agregáveis, obtém-se (1.57),

$$b_{1j}h_1 + b_{2j}h_2 + \dots + b_{nj}h_n - h_j \left(\sum_{i=1}^n b_{ij} \right) = Q_{ej} \quad (1.57)$$

com j a decorrer novamente de 1 até n .

Este último sistema de equações (1.57), pode ser novamente agregado, da forma (1.58),

$$\left(\sum_{i=1}^n b_{ij} h_i \right) - h_j \left(\sum_{i=1}^n b_{ij} \right) = Q_{ej} \quad (1.58)$$

com j a decorrer de 1 até n .

O desenvolvimento, em matriz, deste sistema de equações (1.58), a resolver para determinação da rede de distribuição de água, pode também ser objecto da forma de representação expandida, visualmente melhor observável (1.62), apresentada na página 39.

Separando os elementos presentes neste sistema, nos termos canónicos de coeficientes, incógnitas e termo independente, poder-se-á, por sua vez, também obter o outro sistema equivalente (1.59), onde a matriz $[A]$ é representada pelos coeficientes dispostos em (1.63) da página 39, $\vec{h}$ representa o vector incognita, (1.60), e $\vec{Q}_e$, (1.61).

$$[A]\vec{h} = \vec{Q}_e \quad (1.59)$$

$$[\vec{h}] = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_{(n-1)} \\ h_n \end{bmatrix} \quad (1.60)$$

$$[\vec{Q}_e] = \begin{bmatrix} Q_{e1} \\ Q_{e2} \\ \vdots \\ Q_{e(n-1)} \\ Q_{en} \end{bmatrix} \quad (1.61)$$

$$\left\{ \begin{array}{cccccccc}
(b_{11} - (\sum_{i=1}^n b_{i1}))h_1 & + & b_{12}h_2 & + & \dots & + & b_{1(n-1)}h_{n-1} & + & b_{1n}h_n & = & Q_{e1} \\
b_{21}h_1 & + & (b_{22} - (\sum_{i=1}^n b_{i2}))h_2 & + & \dots & + & b_{2(n-1)}h_{n-1} & + & b_{2n}h_n & = & Q_{e2} \\
\vdots & & \vdots & & \ddots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\
b_{(n-1)1}h_1 & + & b_{(n-1)2}h_2 & + & \dots & + & (b_{(n-1)(n-1)} - (\sum_{i=1}^n b_{i(n-1)}))h_{n-1} & + & b_{(n-1)n}h_n & = & Q_{e(n-1)} \\
b_{n1}h_1 & + & b_{n2}h_2 & + & \dots & + & b_{n(n-1)}h_{n-1} & + & (b_{nn} - (\sum_{i=1}^n b_{in}))h_n & = & Q_{en}
\end{array} \right. \quad (1.62)$$

$$[A] = \begin{bmatrix}
(b_{11} - (\sum_{i=1}^n b_{i1})) & b_{12} & \dots & b_{1(n-1)} & b_{1n} \\
b_{21} & (b_{22} - (\sum_{i=1}^n b_{i2})) & \dots & b_{2(n-1)} & b_{2n} \\
\vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
b_{(n-1)1} & b_{(n-1)2} & \dots & (b_{(n-1)(n-1)} - (\sum_{i=1}^n b_{i(n-1)})) & b_{(n-1)n} \\
b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{n(n-1)} & (b_{nn} - (\sum_{i=1}^n b_{in}))
\end{bmatrix} \quad (1.63)$$

$\vec{Q}_e$ é o vector dos caudais externos que incide sobre os nós, sendo-lhe aplicada a convenção sobre o seu valor positivo. Pode-se considerar, para esta finalidade de convenção de sinais a escolha já anteriormente apresentada, de valores positivos para extracções de caudal da rede de distribuição. A resolução deste sistema implica a resolução de uma equação que é normalmente implícita (1.44), questão que interfere na possibilidade da determinação simples, franca e directa dos coeficientes b_{ij} apresentados. A menos que se explicita a formulação através de (1.45), ou outras de igual teor.

A resolução do sistema, quer se utilizem procedimentos iterativos de resolução das fórmulas de perda de carga, quer se utilizem fórmulas de resistência explicitadas, poderá ser concretizada através de uma abordagem iterativa de resolução de sistema em que

$$[A]^{(n-1)} h^{(n)} = \vec{Q}_e \quad (1.64)$$

equação que expandida para formas já apresentada, poderá possuir a seguinte representação, para abordagem mais facilitada

$$\sum_{i=1}^n (b_{ij}^{(n-1)} h_i^{(n)}) - h_j^{(n)} \left(\sum_{i=1}^n b_{ij}^{(n-1)} \right) = \vec{Q}_{ej} \quad (1.65)$$

em que o índice j se desenvolve sobre todos os nós do sistema, entre os valores 1 e n .

De acordo com a notação já introduzida pela equação (1.64), a matriz A é a matriz de coeficientes do sistema, $\vec{h}$ é o vector incógnita de piezometria que se pretende obter para os nós e $\vec{Q}_e$ é o vector dos caudais externos que seja aplicado sobre os nós (dotados da convenção de sinais já introduzida).

Cada valor de $h^{(n)}$ determinado na iteração n , quantifica, pelas equações desenvolvidas, os valores correspondentes relativos à iteração de ordem n (notação n aqui entendida não como o numero de nós da rede de distribuição, mas de iterações de cálculo).

Este processo iterativo indicado terminará, normalmente, quando o erro constituído pela diferença observada entre duas iterações sucessivas (n) e ($n + 1$) da perda de carga h for inferior a um valor pré-estabelecido, ou após a realização de um número fixo, razoável, de iterações.

O início do processo iterativo de resolução do sistema pode ser realizado com quaisquer valores para os índices b_{ij} . Contudo uma melhor aproximação inicial conduzirá necessariamente a uma diminuição da extensão de cálculo necessário de realizar para a obtenção de um nível determinado de aproximação.

1.2.5 Definição das constantes e contagem das variáveis e equações presentes num sistema de distribuição de água

Aquilo que normalmente se considera conhecido de uma rede de distribuição de água, é todo o conjunto de características físicas da água (viscosidade, temperatura, etc.), como também os comprimentos e diâmetros das tubagens e a altitude dos nós. Em geral engloba-se neste conhecimento, todo o conjunto fronteiriço de condições, ou de caudais de adução, ou de piezometria do abastecimento externo da rede.

Se a rede de distribuição de água dispuser de n nós³ e t tubagens, então pode-se identificar nela:

- t incógnitas, relativas a rugosidades;
- t incógnitas, relativas a caudais (ou velocidades, dado o relacionamento estabelecido destas, através dos diâmetros);
- n incógnitas, relativas a pressão nos nós (ou t perdas de carga em tubagens, linearmente dependentes com as pressões);
- n incógnitas, relativas a consumos nos nós.

Este enunciado soma, no total, $2n + 2t$ variáveis em equação.

Deste conjunto, são à partida conhecidas a adução total, ou a altitude de soleira de todos os nós de reservatório da rede – o que representa uma equação para o sistema. Também é conhecido o relacionamento de continuidade sobre cada um dos n nós do sistema, o que significa a adição concomitante de n equações independentes para o problema (sendo certo que uma destas equações é relativa à continuidade total da adução e consumos nos nós, ou à cota da totalidade dos reservatórios, já considerada). E são conhecidos, por fim, os relacionamentos entre perda de carga e caudal das t tubagens contidos nos desenvolvimentos anteriormente apresentado das fórmulas de resistência, significando esta circunstância dispor-se de mais t equações adicionais.

De qualquer modo, sobejam para resolver $t + n - 1$ incógnitas, não abrangidas pelos relacionamentos referidos no parágrafo anterior.

Na abordagem de dimensionamento de redes de distribuição, este conjunto de variáveis em falta é normalmente fornecido de forma directa pelo modelador, considerando a aplicação de critérios razoáveis para a determinação dos valores a envolver no cálculo. Normalmente indicam-se t rugosidade das condutas e n consumo nos nós, sabendo-se porém à partida que um desses consumos, na realidade, é a adução conhecida de reservatório(s) ao sistema. Ou que, conhecendo-se (fixando-se) a piezométrica de um determinado nó, os seus consumos (adução à rede) serão determinados.

³Nesta contagem não se consideram incluídos os nós de reservatório, nós estes possuidores de altitude necessariamente conhecida.

Na abordagem inversa, isto é de exploração, conhecendo-se no limite a totalidade das n pressões nos nós e os t caudais nos tubos, poder-se-ão obter as t rugosidades envolvidas, por intermédio do relacionamento inverso entre perdas de carga e caudais (que envolvem a rugosidade no seu termo, tornando-a implicitamente determinável). E reconstituindo-se deste modo os $n - 1$ consumos nos nós pela aplicação da equação da continuidade a cada nó do sistema (pressupondo que a altura manométrica nos reservatórios de montante da rede, ou o consumo total, é conhecido).

Poder-se-ão, para outros fins compostos dos anteriores, aplicar outras permutações de incógnitas – rugosidades, pressões, caudais, perdas de carga, ou velocidades – em cada nó ou tubagem respectiva, desde que o conjunto escolhido se relacione de forma não linearmente dependente entre si. Caso contrário obter-se-á a singularização do sistema principal de equações, não se conseguindo a resolução do problema, como pretendido.

Uma formulação deste problema, que também possui especial importância, obtém-se quando se pretende alcançar a calibração do modelo matemático da rede. Estes trabalhos são relativos à obtenção dos consumos nos nós e das rugosidades, conhecidas que sejam amostragens limitadas, em termos geográficos e temporais, do funcionamento das redes. Pela sua importância, mas sobretudo pelas dificuldades envolvidas na sua concretização, que a diferenciam enormemente das duas aplicações mais fáceis anteriormente apresentadas, esta particular aplicação dos modelos matemáticos será abordada em capítulo próprio da presente dissertação. Aliás constituir-se-á como um dos objectivos da presente Dissertação, propor-se uma metodologia de abordagem para a utilização dos modelos matemáticos neste desiderato de abordagem de redes de distribuição de água.

1.2.6 Classificação das redes

A classificação do cálculo de perdas de carga e caudais, em redes de distribuição de água pode ser efectuada em função das características da rede. Estas podem ser divididas em redes *ramificadas* e redes *emalhadas*. As redes *ramificadas*, porque sob determinado prisma de abordagem poderão ser consideradas como um caso particularmente simples de redes *emalhadas*, serão consideradas trivialmente integradas nesta segunda abordagem.

Uma rede *emalhada* (Novais Barbosa, 1985, [167]), é aquela que possui malhas. Por malhas entender-se-á um conjunto de tubos de tal modo dispostos que, percorrendo-se o seu traçado num dado sentido, se consegue atingir novamente a secção de partida. Uma rede ramificada será aquela onde essa característica não possa ser observada.

1.3 ANÁLISE DE TRAÇOS E MODELAÇÃO MATEMÁTICA DA QUALIDADE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

A análise de traços e a modelação da qualidade, aplicadas a sistemas de distribuição de água, centram-se na compreensão do movimento que a água, como produto ele próprio, oferece no interior das respectivas redes, bem como na evolução que as características associadas de qualidade da mesma oferecem ao observador. Importa, nesta análise, relacionar o movimento da água e a transformação de qualidade intrínseca da água, ao longo da sua localização na rede e passagem de tempo sobre o escoamento. A água é, nesta matéria, entendida numa perspectiva mais particular de mistura solvida de componentes, não meramente de um fluido, sendo objecto deste estudo particular a caracterização analítica, observável ao longo do tempo e da geometria dos sistemas.

Os dados que os modelos matemáticos de qualidade desenvolvem, assentam de forma prévia, numa compreensão hidráulica do escoamento, sobretudo velocidade e caudal nas tubagens. A estes factores somam-se os restantes factores físico-químicos, de decaimento, de difusibilidade e de mistura, essencialmente.

Os componentes do sistema de análise de qualidade, para a realização deste tipo de simulação, necessitam de ser ponderados a dois níveis. Um primeiro, o geral do cálculo hidráulico do sistema, já anteriormente desenvolvido em capítulo próprio, e um segundo, ponderando componentes mais próprios desta análise particular, relativa à evolução da qualidade da água.

Para este fim, existe a necessidade de uma pormenorização de estudo que implique componentes tridimensionais de abordagem, de difusibilidade, de mistura global e de mistura de parede, resultantes de os parâmetros físico-químicos envolvidos possuírem normalmente diferenciação de valores e evolução, caso a análise se encontre a ser realizada no interior da massa líquida, ou em situação limite de fronteira de escoamento (Powell, 2000, [183]).

O *decaimento* define-se como a variação, ao longo do tempo, da medida da concentração de um determinado produto solvido na água. Este fenómeno é assim objecto de uma observação que se pretende que diga respeito à água⁴, e não apenas à localização espacial da variação da medida de concentração, relativamente à infraestrutura de distribuição que se pretenda modelar e hidráulica de escoamento, que um sistema de distribuição de água comporta.

O decaimento, simulado sobre modelos matemáticos de redes de abastecimento de água, é normalmente reduzido a uma equação diferencial de primeira ordem do

⁴Intrinsecamente à água, mesmo atendendo a todas as dificuldades de formulação analítica deste elemento que se compreenderão associadas, pelo facto de nos encontrarmos perante um corpo líquido que é, por definição, miscível.

tipo (1.34), já anteriormente apresentada, e desenvolvida em termos integrais em (1.35), (1.36) e (1.37).

O decaimento, quando abordado em termos centrais de escoamento, isto é longe da fronteira do escoamento, é experimentalmente medido através do designado “*teste da garrafa*” (“*jar test*”). Este teste efectua-se num recipiente onde se coloca a água a amostrar, aferindo-se os parâmetros da evolução observada por regressão a um modelo (linear, quadrático, etc) de relacionamento que se considere razoável.

Quando pretendemos abordar o escoamento interior em tubagens, observa-se que o fenómeno possui contornos que o afastam da simplicidade que é oferecida nos termos experimentais anteriormente descritos. A complexidade em causa deriva do facto de se encontrarem presentes condicionantes hidráulicas de resistência da água, que fazem com que o escoamento se processe segundo um perfil de velocidades aproximadamente parabólico, dotado de uma camada limite de velocidade praticamente nula junto às fronteiras do escoamento e turbulência e advecção elevadas à medida que se afasta o ponto de observação para o seio da massa líquida. Estas circunstâncias decorrem da presença de um relativamente elevado gradiente de velocidades, que normalmente se desenvolve sobre estes perfis, em tubagens de redes de distribuição de água.

Este fenómeno transforma o diferencial de velocidades longitudinais, num movimento activo que impele a água no sentido da periferia, contra a parede. Na prática, este fenómeno resulta num mecanismo que pode ser interpretado, para efeitos da simulação da qualidade, pela presença de uma promoção activa do movimento transversal de água, mobilizando-se parte da energia turbulenta viscosa num sentido de renovação da água em contacto mais directo com a tubagem, e reabsorção e mistura posterior dessa mesma água, novamente no seio líquido interior do escoamento.

Sendo a parede o local em que normalmente maior actividade de decaimento ocorre sobre a generalidade das substâncias que se pretenderão tracejar numa rede de distribuição de água, torna-se este fenómeno – de características menores em termos hidráulicos e de energia do escoamento – num fenómeno maior e muito importante de se considerar, na abordagem de compreensão do fenómeno global da qualidade a realizar numa modelação matemática de redes de distribuição de água.

As fronteiras, isto é as paredes, mas também a superfície livre dos reservatórios, podem interferir sobre a reacção de decaimento, quer por via física, isto é obstruindo/facilitando o acesso/fuga de componentes de reacção de decaimento presentes na água (como o oxigénio, atmosférico ou dissolvido, ou o cloro, por exemplo), como pelo facto de a parede se poder constituir activamente como uma superfície de catálise de reacção. Isto mais potencialmente ainda, no caso da presença de depósitos de iões metálicos, precipitados ou constituintes das parede de fronteira.

Como o decaimento da qualidade da água em escoamento sobre tubagens e redes resulta nesta espécie de rotação de água em direcção às paredes, e também

numa mistura de massas diferenciadas de qualidade, longitudinalmente ao longo das tubagens e das redes, o tempo influi na observação deste fenómeno ao longo de percursos de rede (Rossman (2000) [194], Rossman e Boulos (1996) [195], Rossman, Boulos e Altman (1993) [196], Rossman, Clark e Grayman (1994) [197]), o modelo de análise terá de ser necessariamente estendido no tempo. Resulta assim a análise de qualidade em formas mais complexas que uma mera análise hidráulica, necessitando de ver, de forma prévia, determinado o resultado hidráulico da rede para, em consequência desse elemento e acrescentando os novos relacionamentos descritos, se poder explicar relativamente a um determinado momento e estado do escoamento na rede.

Os parâmetros que eventualmente se obtenham laboratorialmente sobre esta matéria, possuem dificuldade de representação sobre o protótipo, dado, da forma explicada, não se poder considerar as questões referenciadas de inter-influência entre as realidades de localização geométrica identificadas, de decaimento central e de parede, adicionadas à interferência do escoamento nestas componentes, que resultam globalmente no decaimento de qualidade da água em redes de água em distribuição.

Cada um destes dois tipos de decaimento referidos, que poderemos designar através dos correspondentes coeficientes k_p e k_c , de decaimento de parede e de decaimento central na tubagem, possuem características que, como justificado, os tornam diferentes entre si, para uma mesma tubagem e simultâneas condições de escoamento.

O inter-relacionamento entre estes dois factores é normalmente simplificado a uma soma, (Powell, 2000) [183], a despeito de todas as questões de complicação que anteriormente foram apresentadas para esta matéria. E que são observadas entre as circunstâncias “*in situ*”, de escoamentos reais, e a forma de obtenção de parâmetros representativos das circunstâncias de escoamento, mas estudados e calibrados em laboratório.

O decaimento central, realizado sob as condicionantes de determinação laboratorial, implica o controle de diversos factores como a temperatura da água e a concentração. O decaimento observa-se relacionado com a passagem do tempo, sendo aferido o parâmetro k_c (decaimento central, ou “*bulk decay*”) que melhor se ajuste às observações realizadas, utilizando-se os procedimentos reservados ao designado “*jar test*”, questão já abordada em parágrafo anterior.

Relativamente à utilização de equações de 1ª ordem ou de ordem superior, observa-se em [183], os coeficientes de correlação obtidos para determinações circunstanciadas do decaimento de cloro em águas de abastecimento. Estas observações de correlação cifram-se entre 0,88 e 0,97.

No escoamento laminar, a difusibilidade será o fenómeno preponderante na realização do transporte indicado. No escoamento turbulento, as variações aleatórias de direcção da velocidade que se encontram presentes, cumprem a parte mais importante deste fenómeno de transporte interior.

1.3.1 Simulação da qualidade em sistemas de distribuição de águas.

Como até agora explicado, a análise de qualidade da água apresenta-se de forma deveras complexa. Mesmo se apenas reduzida à análise a um escoamento interior de tubagem. E isto implica uma muito maior ênfase sobre a complexidade presente, se considerarmos conjuntos de tubagens, organizadas em rede de distribuição de água.

Para se permitir a operacionalidade sobre estas infra-estruturas de uma abordagem de qualidade e de traços, a primeira simplificação que se coloca em linha prática de realização será a de considerarmos o parâmetro de decaimento, k , como uma média obtida da contribuição das duas reactividades apresentadas; central, k_c , e de parede k_p , agregando num só valor a contribuição que a mistura turbulenta da água possa dissimular entre parâmetros centrais e parâmetros de parede (Powell, 2000) [183] de decaimento.

Deste modo, as eventuais contribuições realizadas por diferenciados fenómenos de advecção e de difusão, serão abrangidas de forma conjugada.

Em segundo lugar, considera-se que existe uma mistura completa de água nos nós. O que implica que toda a água que num determinado momento saia de um nó é um “*blend*” completo de toda a água que, nesse mesmo instante, tenha entrado.

Por outro lado, aceita-se correntemente que para concentrações normais dos principais produtos a rastrear pelos modelos, a água não sofra alterações de características que possam resultar em alterações da performance físico-hidráulica do sistema. O que significaria, caso a hipótese não fosse admissível, na necessidade de alteração dos parâmetros correspondentes do modelo hidráulico.

Com estas simplificações, o problema de simulação da qualidade em sistemas de distribuição de água, reduz-se à formulação de um modelo de transporte unidimensional, dotado de mistura instantânea e completa nos nós, aplicada ao material a rastrear e respectiva concentração, cujo andamento de análise decorre em paralelo e consequência da modelação hidráulica desse mesmo sistema de distribuição de água.

O modelo de qualidade e traços, consiste em considerar o movimento da água, em paralelo à progressão da substância e respectiva concentração, somando a isto a acção característica de decaimento (positiva, nula ou negativa) que a substância possa evidenciar na água no interior e na fronteira do sistema de distribuição. Nos nós, a junção da água promove uma mistura completa, resultando esta abordagem num cálculo de resultado único de concentração ponderada, relativamente às contribuições de cada tubagem afluente, sobre as características da água efluente.

Um dos aspectos estruturais da aplicação de modelos de qualidade a redes de distribuição de água implica que a respectiva análise possua, sempre, uma dimensão temporal associada. E que, mais ainda, a extensão no tempo da análise permita a relaxação das condições iniciais aleatórias definidas para o sistema, em outras eventuais condições estabilizadas permanentes.

1.3.2 Métodos de resolução

Para análise de qualidade existem basicamente dois métodos de abordagem. O primeiro oferece-se com um perfil euleriano, dividindo cada tubagem numa série de segmentos fixos de igual comprimento para análise. O segundo, que possui um perfil lagrangeano, acompanha “*blocos*” de água, à medida que essas massas se deslocam ao longo do sistema de distribuição.

Método euleriano

A aproximação euleriana pode ser concretizada pelo desenvolvimento apresentado por Grayman, Clark e Males (1988) [93], formalizado naquilo que estes autores designaram por “*Discrete Volume Method*” (*DVM*), e que foi tornado operacional em Rossman, Boulos e Altman (1993) [196].

No *DVM*, cada tubo é dividido numa série de sub-links, seleccionando-se o comprimento de cada sub-link, de maneira a que a velocidade da água em cada conduta implique o tempo escolhido para passo da análise de qualidade em realização. Isto resulta em que, em cada intervalo de tempo seleccionado para passo, a água passa de um sub-link para o próximo adjacente, em cada uma destas passagens temporais.

Em consequência desta formulação, a dimensão de cada sub-link é própria e adaptada à característica de escoamento que cada tubagem possua, constituindo-se, portanto, como sendo uma unidade localizada e típica de cada tubagem e de cada estado de escoamento. No volume representado por cada sub-link, é considerada toda a variação de qualidade que a água possa conter, quer decorrente de “*reactividades*” ou de decaimentos, na forma propriamente definida para a análise. É desejável, nesta formulação de abordagem desta análise, que o passo de tempo seleccionado como unidade, abranja o menor intervalo de tempo para passagem completa da água, no conjunto completo de tubagens da rede.

Nos nós da rede de distribuição, a água é abordada como possuindo uma mistura completa, passando para jusante uma média pesada das contribuições de montante, no sentido do escoamento.

Método lagrangeano

Na aproximação lagrangeana, o observador move-se conjuntamente com a água que pretende analisar. O meio aquoso é dividido segundo parcelas, às quais se possa considerar legítimo possuírem iguais componentes. As equações de transformação (decaimento ou ressurgimento) dos compostos na água, são objecto de um seguimento centrado na água, ela própria, e não, como no método euleriano, relativa a lugares geométricos. Neste método, sempre que se possa considerar lícito, as transformações de qualidade, nomeadamente decorrentes do alcance de nós, criam lugar a novas subdivisões espaciais para análise.

Dada a criação estrutural, neste método, de subdivisões para a realização da abordagem proposta, tem que se definir métodos para o colapso de parcelas adjacentes, em ordem à manutenção, em número razoável, dos segmentos em análise. Para este fim existem propostas múltiplos algoritmos para a realização desta necessidade do método de análise, nomeadamente comportando a mistura ponderada de volumes.

A modelação lagrangeana de qualidade, tanto pode ser conduzida por imposição de períodos diferenciais de análise, como pela ocorrência de eventos singulares. No primeiro caso, a análise diz respeito a análises em períodos fixos estabelecidos; na segunda possibilidade, é a constatação da ocorrência de eventos da modelação que determina os intervalos aos quais diga respeito uma determinada análise.

1.3.3 Comentários aos modelos de qualidade e traços aplicados a sistemas de abastecimento de água

Rossman e Boulos (1996) [195] avaliaram as diversas respostas que diversas formulações dos métodos indicados realizados em condições de igualdade de circunstâncias. Constatam que as precisões dos métodos são equivalentes, exceptuando certas excepções, que enumeram. Por outro lado, o tamanho da rede não será indicador seguro, quer do tempo necessário para o cálculo, quer para a memória necessária de dispendir. Para modelações químicas, os métodos lagrangeanos apresentam-se mais eficientes, quer em utilização de processador, quer em exigências de memória. Para modelar a idade da água, o designado TDM (da terminologia inglesa “*time driven method*”, um método lagrangeano) é mais rápido a obter resultados, mas os métodos eulerianos são os que dispendem menos memória.

Constata-se dos desenvolvimentos apresentados que a modelação de qualidade terá de ser concretizada dentro de uma dimensão espaço-temporal estendida, integrando-se dentro desta abordagem as respostas da modelação físico hidráulicas (isto é consumos, rugosidades, níveis de reservatórios, etc.) e respectivas funções de variação temporais.

A progressão do modelo de qualidade é realizada, para cada momento, considerando sobre cada tubagem a incidência dos parâmetros físico hidráulicos, analisando-se de montante as características de qualidade que tenham sido determinadas em períodos anteriores.

É porém claro que a contribuição dos modelos de qualidade, em complemento dos modelos hidráulicos, pode-se constituir como um precioso auxiliar para o objectivo de obtenção de condicionantes adicionais independentes, que procurem um processo de inversão das matrizes de sistema das equações envolvidas. Nomeadamente quando o conhecimento de outras variáveis directas escasseiam, penalizando-se a facilidade de trabalhos de calibração mais extensamente válidos, e realizados com a maior economia de meios, possíveis. Esta circunstância decorre do galopante incremento de

capacidade de cálculo que a informática, cada vez mais, oferece aos seus utilizadores.

Todavia para aplicação da análise ao modelo que se pretende propor, para calibração/determinação inversa de redes, tem-se de concretizar ainda, sobretudo, a redução dos parâmetros envolvidos a formas ponderadas, identificando as inter-influências dos fenómenos de localização observados. Solução esta ainda não desenvolvida com generalidade suficiente para poder ser objecto de aplicação ao âmbito do presente conjunto de hipóteses colocadas em tese.

Nestas circunstâncias optou-se pela não aplicação, no presente momento, da contribuição potencial da análise da qualidade, para a formulação proposta de calibração, que se desenvolveu. Não se perdeu de vista, contudo, que esta poderá ser uma contribuição fundamental para enriquecimento da presente abordagem, enfatizando-se este caminho como possibilidade de desenvolvimento futuro e detalhando-se, mais adiante nesta Dissertação, os relacionamentos dimensionais identificados, realidade que fundamentará este desenvolvimento pretendido.

1.4 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS A REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

1.4.1 Equação do problema

Até agora, desenvolveram-se as formulações físicas, química e matemática, aplicáveis à determinação de redes de distribuição de água. Os sistemas de equações decorrentes, aplicáveis ao cálculo hidráulico de redes de distribuição de água foram anteriormente desenvolvidos da forma particular realizada, nomeadamente, para obter a compreensão concomitante dos mesmos. Porém, representando estas relações em termos simplificados por $f_{ij}(x)$, Shamir (1968) [212] observou que:

i)

$$f_{ij}(x) = -f_{ij}(-x), \quad (1.66)$$

e que;

ii)

$$f_{ij}(x), \quad (1.67)$$

são contínuas e crescentes para todo o domínio.

Estas conclusões contidas em (1.66) e (1.67), que demonstram simetria, unicidade e monotonia destes sistemas de equações, provam a presença de características semelhantes, relativa aos seus respectivos inversos. Circunstância que mais não representa que a possibilidade teórica de determinação inversa do modelo matemático da rede, a máxima possibilidade de calibração do modelo, já em circunstância de determinação inversa completa. Isto é, o modelo matemático de redes de distribuição de água não só é determinado, unívoco e monótono, nos termos normais em que seja estabelecido (para projecto, por exemplo), como a sua inversão (em calibração) oferece idênticas características e possibilidades teóricas de concretização.

Este facto constitui-se como o centro justificador teórico da proposta de modelo de calibração realizada pela presente Dissertação, desenvolvida apesar dos riscos que a investigação deste tipo de problemas implicam. Nomeadamente no contexto de uma tese de Mestrado, que comporta prazos e circunstâncias limites para se desenrolar.

Como se observa nos cálculos obtidos e apresentados em parte própria do presente texto, sobre o modelo proposto para o fim de obtenção de calibrações válidas de redes de distribuição de água, comportaram-se importantes dificuldades, decorrentes quer

das não linearidades presentes, quer de elevadas insensibilidades relativas de algumas das variáveis presentes no modelo.

Apesar destas dificuldades, decorrentes directamente do equacionamento da perda de carga em condutas, que é não só de definição implícita, mas também objecto de uma relativa insensibilidade à variação, sobretudo, da variável rugosidade, Shamir (1968) [212], ao demonstrar a existência de uma unicidade da função energia, implica o desiderato teórico da calibração como obedecendo a um desenvolvimento teórico identicamente possível de realizar. E se este objectivo se observar padecer de alguma indeterminação, teremos de concluir que esta terá de ser mera consequência de insuficiência de dados de amostragem sobre as redes, e não de impossibilidades algébricas que eventualmente se encontrassem envolvidas. Nomeadamente se a univocidade, continuidade e monotonia das funções de resistência não se encontrassem garantidas.

Portanto, podemos concluir como sendo determinado o problema da calibração/inversão de sistemas de modelos de redes de distribuição de água, desde que existam métodos suficientemente sensíveis, que compensem e ultrapassem a formulação implícita e a insensibilidade relativa das variáveis que se envolvem.

A calibração do modelo matemático de redes de distribuição de água e a validação dos resultados, a despeito das dificuldades que se evidenciam, são porém trabalhos necessários, no sentido de conferir às utilizações de modelos matemáticos, a necessária confiança para poder tornar relevantes os resultados desta aplicação matemática.

Aliás todos os esforços de investigação observados sobre esta matéria, profusamente ilustrados pela vasta bibliografia compilada, não representam mais que a importância que este mesmo assunto suscita a múltiplos investigadores espalhados pelo mundo inteiro.

1.4.2 Classificação dos trabalhos e utilidade

A calibração de modelos matemáticos pode ser definida (Walski e al. 2003, [248]) como um processo de comparação entre os resultados dos modelos e observações de campo das redes, que comportam, se necessário, o ajuste de dados descritores dos sistemas, tendo em vista que as previsões de modelo se aproximem do observado no protótipo, no mais vasto leque de circunstâncias de funcionamento que possa ser evidenciado pelo protótipo. Segundo este autor, a calibração de redes de distribuição de água possui em vista, *i*) conferir confiança à aplicação do modelo; *ii*) a melhor compreensão do protótipo em presença e; *iii*) identificar problemas na expressão de cadastro da rede.

O diâmetro e o comprimento das tubagens, bem como outros elementos de topologia, geográfica e de interligação da rede, são normalmente considerados como parâmetros de medição directa. Ou simplesmente conhecidos e estruturais das redes.

Todavia os processos de calibração poderão identificar medidas ou informações de estado incorrectamente estabelecidas, podendo identificar um alargado leque destas situações, potencialmente sempre presentes num sistema de base de dados e de informações extensas, como é o caso normal de redes de distribuição de água.

Os consumos nos nós e as rugosidades possuem difícil abordagem de medição directa. Nomeadamente porque; os primeiros, padecem de grande dificuldade para medição (exigir-se-ia a contagem, sincronizada temporalmente, da totalidade dos consumos de água afectos a cada nó, em simultâneo para a totalidade da rede) e; as segundas, são obtidas sempre por observações indirectas de outros parâmetros (caudal/velocidade de escoamento e perda de carga) inseridos na formulação seleccionada como representativa da perda de energia do escoamento.

Por outro lado, na circunstância de apenas dispormos de um número limitado de estados de solicitação, numa extensão temporal de análise reduzida, observamos presentes no sistema múltiplas possibilidades de compensação de erros de calibração, que são essencialmente decorrentes da falta de dados mais extensos. E neste aspecto sublinha-se que a eventual extensão temporal da amostragem não compensa eventual deficiência de distribuição geométrica do aspecto da amostragem, sobre a rede em análise. De facto, a singularidade deste sistema, nesta circunstância, apenas pode ser ultrapassada se disponibilizarmos dados que se possam oferecer de forma mais extensa, diferenciada e independente.

Esta circunstância expressa-se, por exemplo, pela possibilidade da presença de múltiplas soluções de rugosidades, para uma mesma perda de carga observada entre dois mesmos nós, mas que se liguem através de um conjunto vário de condutas. Mesmo num sistema mínimo de condutas em paralelo, isto é duas condutas, uma mesma solicitação sobre o protótipo pode resultar em múltiplas possibilidades de expressão dos caudais e rugosidades atribuíveis às condutas em presença, face a uma mesma perda de carga e possibilidade de transporte. Esta indeterminação pode todavia ser ultrapassada, se se conhecer adicionalmente um número de solicitações que se ofereçam como diferenciadas e independentes, e que possibilitem a colocação do sistema numa forma eventualmente determinada.

Nesta perspectiva, e no modelo proposto de calibração, o contorno destas circunstâncias propõe-se que seja realizado aferindo a estrutura de amostragem por critérios que sejam, de algum modo, racionais, consequentemente organizada face a necessidades observáveis. E englobando os valores das pressões e dos caudais de diversos estados de solicitação do protótipo, sobre um período temporal extenso de amostragem e de simulação.

Esta perspectiva permitirá reduzir a forma não unívoca de resolução, que é presente num sistema com dados limitados e que se possam oferecer como linearmente dependentes, como descrito, podendo resultar, de outro modo, numa abordagem de resolução determinada.

1.5 MÉTODOS GERAIS DE OPTIMIZAÇÃO

A abordagem de optimização poderá ser conduzida através de um conjunto de métodos gerais dos quais, seguidamente, se tenta realizar breve descrição efectuada sobre os mais significativos (Walski, 2003) [248].

1.5.1 Optimização por tentativa e erro

Este método constitui-se, dentro da abordagem geral iterativa, como aquela que alia a experiência do modelador, à selecção directa das hipóteses de solução. Desenvolve-se através da intervenção directa do discernimento do operador.

1.5.2 Optimização por enumeração parcial

Este método enumera condições limites das soluções. Pelo conhecimento assim alcançado do funcionamento da estrutura em análise, permite-se traçarem-se as amplitudes de solução possíveis, eliminando-se do problema as restantes.

1.5.3 Programação linear

O recurso à programação linear para optimização de funções, revela-se como um método importante, aplicado a sistemas de abastecimento de água. Dada a não linearidade do problema hidráulico em equação nas redes de distribuição de água, esta metodologia aplica-se porém com especial ênfase a todas as outras aplicações que se ofereçam de forma linear. Como é o caso, por exemplo, da minimização de custos de concepções de infra-estruturas de distribuição de água ramificadas, face a conjuntos de solicitações determinadas de projecto. Nesta aplicação as variáveis de decisão são constituídas pelo comprimento de conduta implementado e os custos unitários aferidos, para cada diâmetro, de uma tabela de tubagens passíveis de instalação.

A programação linear oferece-se sobre um espaço de soluções convexo e onde o óptimo ocorre nos limites estabelecidos das condições de restrição do sistema. Esta circunstância permite que este método, quando aplicável a um determinado sistema, se ofereça como facilmente implementável e de reduzido dispêndio de cálculo.

1.5.4 Programação não linear

A programação não linear constitui-se como mais adequada para a abordagem dos problemas hidráulicos que são, por natureza, não lineares. Todavia estes métodos, dado não garantirem a presença da solução na fronteira das restrições (como garantido pela programação linear) implica um muito maior esforço computacional.

A resolução do sistema e a busca de máximo implicam o conhecimento das segundas derivadas do relacionamento parcial entre as variáveis, circunstância que nos sistemas hidráulicos apenas pode ser realizado por abordagens numéricas. O espaço de busca também se torna muito mais vasto que numa implementação linear, não sendo também garantido possuir configuração convexa.

1.5.5 Métodos de busca

Em determinados sistemas físicos particulares, como é o caso dos sistemas hidráulicos, dada a complexidade do relacionamento entre as variáveis em presença (que não é completamente conhecido, ou se expressa de formas complexas e implícitas) os métodos de busca evidenciam-se como bons resultados de aplicação. O figurino geral da sua aplicação constitui-se pela instituição de uma estratégia de gerar e testar soluções.

1.5.6 Algoritmos genéticos

Dadas as particularidades de aplicação destes métodos de optimização ao presente trabalho, oferecer-se-á um desenvolvimento particular dos mesmos, tratando-os autonomamente num capítulo próprio da presente dissertação. Os métodos genéticos, podem ser classificados como pertencentes ao conjunto dos métodos estocásticos [248].

1.5.7 Método dos mínimos quadrados

Dada a presença, no modelo de calibração que se pretende desenvolver no âmbito da presente tese, da necessidade de domínio de processos de optimização multi-objectivo para a obtenção de resultados, apresentam-se, seguidamente, alguns desenvolvimentos estudados nesta matéria.

É, nomeadamente, desenvolvido um polinómio de grau geral para o método dos mínimos quadrados que foi efectuado pelo autor, que será aplicável ao ajuste de evolução e da sensibilidade dos parâmetros gerais que se pretendam estudar nas redes de distribuição de água.

O método dos mínimos quadrados representa uma metodologia matemática que, perante um conjunto de dados, relaciona estes aos parâmetros de uma qualquer determinada função, tendo em vista se obter a máxima aproximação dessa equação, aos referidos dados.

A objectivação do processo é, normalmente, a minimização da distância quadrática do conjunto de elementos dados, ao universo de definição da curva de função que escolhamos, determinando-se a partir desse objectivo, os elementos particulares concretos de definição, que constituam a família geométrica seleccionada.

Tabela 1.1: Conjunto de incógnitas de relacionamento

X	$x_1; \quad x_2; \quad \dots; \quad x_k.$
Y	$y_1; \quad y_2; \quad \dots; \quad y_k.$

Os dados que estiverem em causa de aproximar, tanto poderão ser obtidos por via experimental e serem mesmo dotados de erros na sua determinação, como serem gerados através de uma qualquer função de distribuição de variável aleatória, previamente seleccionada.

Em princípio, qualquer função com parâmetros conhecidos pode servir de base ao procedimento de minimização quadrática que se pretende desenvolver. Todavia a família de funções que normalmente melhor se operam como funções de aproximação são os polinómios.

Para esta família de funções, abordadas como curvas de aproximação, considere-se que o conjunto de dados experimental que se pretendam aproximar seja representado por uma tabela do tipo da Tabela (1.1) e admita-se, também, que a função de aproximação, φ , será do tipo polinomial, expressando-se numa forma geral pela equação (1.68).

$$y = \varphi(x, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n) = a_0x^0 + a_1x^1 + a_2x^2 + \dots + a_{n-1}x^{n-1} + a_nx^n \quad (1.68)$$

O método dos mínimos quadrados pretende obter a minimização da função soma S , definida na equação (1.69).

$$S(a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n) = \sum_{i=1}^k [y_i - \varphi(x, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n)]^2 \quad (1.69)$$

O problema é reduzido, deste modo, a se encontrar o mínimo desta função soma, podendo este objectivo ser alcançado a partir da resolução do sistema de equações de derivadas parciais, representado na equação (1.70).

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial a_1} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial a_2} = 0; \quad \dots; \quad \frac{\partial S}{\partial a_{n-1}} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial a_n} = 0 \quad (1.70)$$

Este conjunto de equações representa um sistema de $n + 1$ equações a $n + 1$ incógnitas, em número idêntico aos coeficientes polinomiais em determinação. A partir da resolução deste sistema, em princípio e se não singular, determinar-se-ão os parâmetros da curva geométrica de aproximação. A singularidade da matriz que se encontra presente decorrerá de se utilizarem dados insuficientes para a definição mínima de um polinómio de grau 1, isto é, uma recta, definida no mínimo por um par de pontos. A singularidade da matriz apresentada, também pode se originar por uma regressão que resulte de forma vertical, no espaço cartesiano, circunstância geométrica que não possui determinação finita de coeficientes para a forma de representação polinomial que se pretende ver alcançada no presente desenvolvimento.

O sistema anterior (1.70) desenvolve-se algebricamente dos modos sucessivamente representados em (1.71) e (1.72).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial a_0} \left\{ \sum_{i=1}^k [y_i - \varphi(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n)]^2 \right\} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial a_1} \left\{ \sum_{i=1}^k [y_i - \varphi(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n)]^2 \right\} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial a_2} \left\{ \sum_{i=1}^k [y_i - \varphi(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n)]^2 \right\} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial a_{n-1}} \left\{ \sum_{i=1}^k [y_i - \varphi(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n)]^2 \right\} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial a_n} \left\{ \sum_{i=1}^k [y_i - \varphi(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n)]^2 \right\} = 0 \end{array} \right. \quad (1.71)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^k (y_i - \varphi(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n)) \times \frac{\partial \varphi(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n)}{\partial a_0} = 0 \\ \sum_{i=1}^k (y_i - \varphi(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n)) \times \frac{\partial \varphi(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n)}{\partial a_1} = 0 \\ \sum_{i=1}^k (y_i - \varphi(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n)) \times \frac{\partial \varphi(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n)}{\partial a_2} = 0 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^k (y_i - \varphi(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n)) \times \frac{\partial \varphi(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n)}{\partial a_{n-1}} = 0 \\ \sum_{i=1}^k (y_i - \varphi(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n)) \times \frac{\partial \varphi(x_i, a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n)}{\partial a_n} = 0 \end{array} \right. \quad (1.72)$$

Substituindo a função φ , pelo polinómio expandido, já anteriormente representado, o sistema de equações que minimiza a função soma, toma a forma representada na equação (1.73).

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0x_i^0 + a_1x^1 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n)] \times \frac{\partial(a_0x_i^0 + a_1x_i^1 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n)}{\partial a_0} = 0 \\ \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0x_i^0 + a_1x^1 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n)] \times \frac{\partial(a_0x_i^0 + a_1x_i^1 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n)}{\partial a_1} = 0 \\ \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0x_i^0 + a_1x^1 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n)] \times \frac{\partial(a_0x_i^0 + a_1x_i^1 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n)}{\partial a_2} = 0 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0x_i^0 + a_1x^1 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n)] \times \frac{\partial(a_0x_i^0 + a_1x_i^1 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n)}{\partial a_{n-1}} = 0 \\ \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0x_i^0 + a_1x^1 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n)] \times \frac{\partial(a_0x_i^0 + a_1x_i^1 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n)}{\partial a_n} = 0 \end{array} \right. \quad (1.73)$$

Operando algebricamente este sistema de equações, obtém-se (1.74),

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0x_i^0 + a_1x^1 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n)] \times \frac{\partial(a_0x_i^0)}{\partial a_0} = 0 \\ \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0x_i^0 + a_1x^1 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n)] \times \frac{\partial(a_1x_i^1)}{\partial a_1} = 0 \\ \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0x_i^0 + a_1x^1 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n)] \times \frac{\partial(a_2x_i^2)}{\partial a_2} = 0 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0x_i^0 + a_1x^1 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n)] \times \frac{\partial(a_{n-1}x_i^{n-1})}{\partial a_{n-1}} = 0 \\ \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0x_i^0 + a_1x^1 + \dots + a_{n-1}x_i^{n-1} + a_nx_i^n)] \times \frac{\partial(a_nx_i^n)}{\partial a_n} = 0 \end{array} \right. \quad (1.74)$$

que derivando e operando algebricamente, é equivalente a (1.75).

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0 x_i^0 + a_1 x_i^1 + \dots + a_{n-1} x_i^{n-1} + a_n x_i^n)] \times x_i^0 = 0 \\ \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0 x_i^0 + a_1 x_i^1 + \dots + a_{n-1} x_i^{n-1} + a_n x_i^n)] \times x_i^1 = 0 \\ \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0 x_i^0 + a_1 x_i^1 + \dots + a_{n-1} x_i^{n-1} + a_n x_i^n)] \times x_i^2 = 0 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0 x_i^0 + a_1 x_i^1 + \dots + a_{n-1} x_i^{n-1} + a_n x_i^n)] \times x_i^{n-1} = 0 \\ \sum_{i=1}^k [y_i - (a_0 x_i^0 + a_1 x_i^1 + \dots + a_{n-1} x_i^{n-1} + a_n x_i^n)] \times x_i^n = 0 \end{array} \right. \quad (1.75)$$

Desenvolvendo este sistema, obtém-se o sistema (1.76).

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 \sum_{i=1}^k x_i^0 x_i^0 + a_1 \sum_{i=1}^k x_i^1 x_i^0 + \dots + a_{n-1} \sum_{i=1}^k x_i^{n-1} x_i^0 + a_n \sum_{i=1}^k x_i^n x_i^0 = \sum_{i=1}^k y_i x_i^0 \\ a_0 \sum_{i=1}^k x_i^0 x_i^1 + a_1 \sum_{i=1}^k x_i^1 x_i^1 + \dots + a_{n-1} \sum_{i=1}^k x_i^{n-1} x_i^1 + a_n \sum_{i=1}^k x_i^n x_i^1 = \sum_{i=1}^k y_i x_i^1 \\ a_0 \sum_{i=1}^k x_i^0 x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^k x_i^1 x_i^2 + \dots + a_{n-1} \sum_{i=1}^k x_i^{n-1} x_i^2 + a_n \sum_{i=1}^k x_i^n x_i^2 = \sum_{i=1}^k y_i x_i^2 \\ \vdots \\ a_0 \sum_{i=1}^k x_i^0 x_i^{n-1} + a_1 \sum_{i=1}^k x_i^1 x_i^{n-1} + \dots + a_{n-1} \sum_{i=1}^k x_i^{n-1} x_i^{n-1} + a_n \sum_{i=1}^k x_i^n x_i^{n-1} = \sum_{i=1}^k y_i x_i^{n-1} \\ a_0 \sum_{i=1}^k x_i^0 x_i^n + a_1 \sum_{i=1}^k x_i^1 x_i^n + \dots + a_{n-1} \sum_{i=1}^k x_i^{n-1} x_i^n + a_n \sum_{i=1}^k x_i^n x_i^n = \sum_{i=1}^k y_i x_i^n \end{array} \right. \quad (1.76)$$

A separação dos coeficientes presentes neste sistema, resulta na matriz $[A]$, presente na equação (1.77),

$$[A] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k x_i^0 x_i^0 & \sum_{i=1}^k x_i^1 x_i^0 & \dots & \sum_{i=1}^k x_i^{n-1} x_i^0 & \sum_{i=1}^k x_i^n x_i^0 \\ \sum_{i=1}^k x_i^0 x_i^1 & \sum_{i=1}^k x_i^1 x_i^1 & \dots & \sum_{i=1}^k x_i^{n-1} x_i^1 & \sum_{i=1}^k x_i^n x_i^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^k x_i^0 x_i^{n-1} & \sum_{i=1}^k x_i^1 x_i^{n-1} & \dots & \sum_{i=1}^k x_i^{n-1} x_i^{n-1} & \sum_{i=1}^k x_i^n x_i^{n-1} \\ \sum_{i=1}^k x_i^0 x_i^n & \sum_{i=1}^k x_i^1 x_i^n & \dots & \sum_{i=1}^k x_i^{n-1} x_i^n & \sum_{i=1}^k x_i^n x_i^n \end{bmatrix} \quad (1.77)$$

bem como nos vectores coluna incógnita $[b]$ e termo independente $[c]$ das duas igualdades presentes em (1.78) e (1.79).

$$[b] = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{n-1} \\ a_n \end{bmatrix} \quad (1.78)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k y_i x_i^0 \\ \sum_{i=1}^k y_i x_i^1 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^k y_i x_i^{n-1} \\ \sum_{i=1}^k y_i x_i^n \end{bmatrix} \quad (1.79)$$

Transformando a not   o de somatório até agora aplicada, e representando-o, em alternativa, pela maiúscula correspondente do conjunto em soma ilustrado em (1.80),

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\sum_{i=1}^k (x_i^j)}{k} = \overline{X^j}; \\ \frac{\sum_{i=1}^k (y_i x_i^j)}{k} = \overline{Y X^j}. \end{array} \right. \quad (1.80)$$

verifica-se que, para além de se reduzir os coeficientes a uma expressão de momentos da distribuição observada, simplifica-se também a representação deste sistema de equações. Deste modo, a matriz de determinação de coeficientes do polinómio de mínimos quadrados, A , e o vector de termos independentes, c , podem assumir a seguinte forma compacta representada em (1.81),

$$[A] = \begin{bmatrix} \overline{X^0 X^0} & \overline{X^1 X^0} & \dots & \overline{X^{n-1} X^0} & \overline{X^n X^0} \\ \overline{X^0 X^1} & \overline{X^1 X^1} & \dots & \overline{X^{n-1} X^1} & \overline{X^n X^1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \overline{X^0 X^{n-1}} & \overline{X^1 X^{n-1}} & \dots & \overline{X^{n-1} X^{n-1}} & \overline{X^n X^{n-1}} \\ \overline{X^0 X^n} & \overline{X^1 X^n} & \dots & \overline{X^{n-1} X^n} & \overline{X^n X^n} \end{bmatrix}; \quad (1.81)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} \overline{Y X^0} \\ \overline{Y X^1} \\ \vdots \\ \overline{Y X^{n-1}} \\ \overline{Y X^n} \end{bmatrix}.$$

dado que podemos dividir os coeficientes da matriz e os termos independente por k , representado k o número de elementos a considerar, para deste modo se obter momentos da distribuição em análise.

Estabelecendo-se por outro lado por definição (1.82),

$$\overline{X^j X^m} = \overline{X^{j+m}}; \quad \overline{X^0} = 1. \quad (1.82)$$

resulta que a matriz A do sistema presente em (1.81), pode ser representada da forma indicada em (1.83), circunstância que lhe é equivalente.

$$[A] = \begin{bmatrix} \overline{X^0} & \overline{X^1} & \dots & \overline{X^{n-1}} & \overline{X^n} \\ \overline{X^1} & \overline{X^2} & \dots & \overline{X^n} & \overline{X^{n+1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \overline{X^{n-1}} & \overline{X^n} & \dots & \overline{X^{2n-2}} & \overline{X^{2n-1}} \\ \overline{X^n} & \overline{X^{n+1}} & \dots & \overline{X^{2n-1}} & \overline{X^{2n}} \end{bmatrix} \quad (1.83)$$

Ainda se poderá compactar mais este sistema de equações, viabilizando uma representação que permite resumir a relação deste sistema à equação (1.84).

$$A \times b = c \quad (1.84)$$

Este sistema condensa o conjunto de operações que se necessita de se ver desenvolvido, tendo-se em vista a obtenção dos coeficientes relativos à definição de um polinómio de grau n , que maximize o ajuste a um conjunto de dados de k elementos, cada um deles relativo a um par de pontos reais (x_i, y_i) , representados no plano cartesiano OXY .

Para o caso particular de se pretender que o polinómio de minimização quadrática em causa de determinação possua grau 1 (que corresponde ao ajuste de um determinado conjunto de pontos a uma recta), o sistema anteriormente desenvolvido oferecerá a seguinte configuração própria particular (1.85),

$$\begin{bmatrix} 1 & \overline{X} \\ \overline{X} & \overline{X^2} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \overline{YX^0} \\ \overline{YX} \end{Bmatrix} \quad (1.85)$$

onde a recta de mínimos quadrados do conjunto de pontos a aproximar, se expressará pela função geometricamente definível pela fórmula (1.86).

$$y(x) = a_0 + a_1x \quad (1.86)$$

Nesta função, os coeficientes a_0 e a_1 determinam-se da resolução do sistema apresentado, desenvolvido a partir dos termos enunciados para o caso geral de polinómio de grau n .

A aplicação da regra de *Cramer*, [3] [4], à resolução do sistema (1.86), permite-nos obter de forma directa (1.87).

$$a_0 = \frac{\begin{vmatrix} \bar{Y} & \bar{X} \\ \overline{XY} & \overline{X^2} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \bar{X} \\ \bar{X} & \overline{X^2} \end{vmatrix}}; \quad a_1 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \bar{Y} \\ \bar{X} & \overline{XY} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & \bar{X} \\ \bar{X} & \overline{X^2} \end{vmatrix}}; \quad (1.87)$$

Do cálculo presente nestas duas igualdades, obtém-se de forma consequente e resumida as equações presentes em (1.88).

$$a_0 = \frac{\bar{Y} \times \overline{X^2} - \bar{X} \times \overline{XY}}{\overline{X^2} - \bar{X} \times \bar{X}}; \quad a_1 = \frac{\overline{XY} - \bar{X} \times \bar{Y}}{\overline{X^2} - \bar{X} \times \bar{X}} \quad (1.88)$$

Os componentes respectivos destes dois quocientes possuem os significados já definidos ao longo do desenvolvimento do presente capítulo. No caso da recta, estes mesmos componentes podem ser interpretados como os momentos de primeira e de segunda ordem, bem como cruzado de primeira ordem, da distribuição de pontos que se encontrar em análise.

1.6 ALGORITMOS GENÉTICOS

1.6.1 introdução

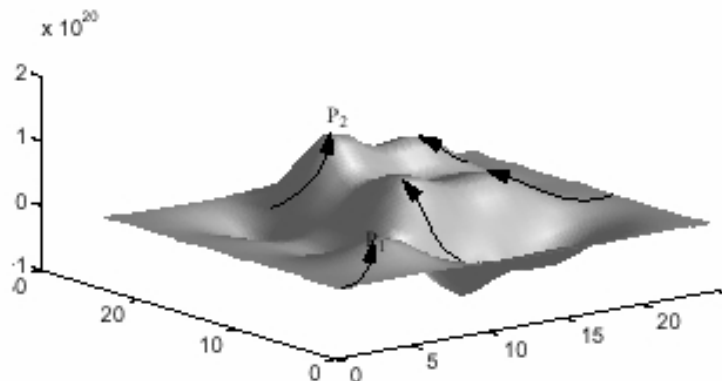


Figura 1.4: (Chipperfield, A., Fleming, P., Pohlheim, H., Fonseca, C, 1994), [44]

Foi John Holland o investigador pioneiro que, em trabalhos realizados a partir de 1975, introduziu o conceito que hoje se identifica como contido na família dos algoritmos genéticos. Esta abordagem que tem sido continuamente aperfeiçoada a partir dessa altura, organiza o cálculo em torno de uma estrutura de dados que obedece às regras operacionais que se conseguem compreender para a evolução dos seres vivos.

Dentro de cada problema em modelação, cada solução – entendida como um indivíduo – é avaliada dentro de uma população representada como conjunto de indivíduos/soluções, aos quais se atribui o relacionamento de um código unívoco, representativo das características individuais. Este código é submetido, durante o desenrolar do algoritmo, a avaliação de aproximação à solução, bem como a operadores de *selecção*, *multiplicação*, *crossover* e *mutação*.

No âmbito de uma utilização de algoritmo genético, define-se *população* como um conjunto de soluções codificadas, soluções as quais sofrerão *avaliação*, associando-se o respectivo código a características mais extensas fenotípicas, as quais se constituem como as que se pretende avaliar. A *avaliação* incide no modo como o fenótipo (isto é a consequência do código) se aproxima da solução, e não sobre o código ele próprio. A população inicial é normalmente determinada de forma aleatória.

Selecção é o operador genético que determina o mecanismo de escolha dos indivíduos “*progenitores*”, tendo em vista a realização posterior da multiplicação.

Multiplicação, define-se como sendo o operador pelo qual os indivíduos que forem seleccionados transmitem as suas características de código (e fenotípicas decorrentes) à geração populacional seguinte.

Crossover é um inglesismo que significa o operador que, sob determinada probabilidade definida para sua aplicação, concretiza um cruzamento entre pares de

códigos de soluções/indivíduos, seleccionados para reprodução.

Por fim, *mutação* define-se como sendo o operador genético a partir do qual, dentro de uma probabilidade definida para o problema, se faz com que o código de um qualquer indivíduo seja simplesmente *mutado*, isto é, sofra uma alteração aleatória numa qualquer das informações contidas no seu código.

A codificação em algoritmos genéticos é normalmente realizada segundo formas binárias. Pode-se, contudo, e por questões de compactação do espaço que normalmente é exigido para memória, efectuar-se uma codificação através de números representados na sua forma real ($\mathbb{R}$). O conjunto de informações pertencentes a cada indivíduo organiza-se normalmente em sequência, designando-se por *alelo*, cada sub-conjunto de informação que seja respeitante à mesma característica e, o conjunto de *alelos* de um indivíduo, como *cromossoma*.

A perspectiva de algoritmo genético assimila os dados como que se se tratasse de estruturas dotadas de uma espécie de capacidade de sobrevivência, atribuída por critérios definidos artificialmente de ajuste. O algoritmo contém os mecanismos anteriormente indicados e definidos, e onde, basicamente, se efectua a verificação do grau de adequação, relativo de cada indivíduo, à solução que se procure. Não se necessita, contudo, de se conhecer, de forma extensa, qual a abordagem de relacionamento matemático, ou de qualquer outra espécie, sobre o fenómeno em causa de optimização.

Os algoritmos genéticos constituem-se, deste modo, como uma formulação de busca de soluções, em que a resolução do problema que se pretende alcançar não necessita de ser visto através da sua própria formulação física directa, mas apenas através de uma observação indirecta do ajuste que uma determinada população, representante de soluções codificadas, ofereça.

A população inicial de indivíduos pode ser gerada e operada ao longo da sequência do algoritmo através de regras estritas que tornam distintivos estes algoritmos, face a outros, nomeadamente no âmbito dos algoritmos evolucionários.

Um algoritmo genético na fórmula proposta inicialmente por Holland, entende-se [Eshelman, L. J., Handbook of Evolutionary Computation, release 97/1] [82] possuir três características que, dentro do conjunto dos métodos evolucionários, o particularizam. Estas características são: (1) representação do indivíduo: por cadeia de bit's; (2) método proporcional para a selecção e; (3) a mutação como principal método para introduzir variações populacionais.

Em termos matemáticos, um algoritmo genético pode ser entendido como sendo (Whitley, D., A Genetic Algorithm Tutorial) [251], uma formulação multi-dimensional de aproximação a problemas complexos, uma espécie de método de Simpson generalizado a um hiper-cubo, mas dotado de mecanismos de *force*, que promovem uma aproximação generalizada à melhor solução relativa que, num determinado momento do cálculo, se observe, utilizando a totalidade dimensional do domínio

envolvido, numa busca múltipla e multi-dimensional de optimização do sistema.

A conjugação, no algoritmo genético, dos operadores de crossover e de mutação, anteriormente definidos, torna-se facto essencial para a promoção, no algoritmo, de uma forma simultânea e complementar, quer de uma deriva transversal da população, relativamente a características que sejam favoráveis ao ajuste dos indivíduos, como é o caso do primeiro operador, quer de dispersão e busca extensiva na totalidade potencial de espaço amostral, de busca de soluções, no segundo caso.

No entanto múltiplas variações são admitidas neste domínio particular da computação genética, sendo este aspecto recorrentemente objecto de testes e teses, aplicadas sobre problemas concretos submetidos a análises e investigações.

A implementação de uma formulação canónica de um AG inicia-se através do estabelecimento de uma população de cromossomas, que são gerados tipicamente de forma aleatória. No passo seguinte avaliam-se as estruturas que se obtiveram dos procedimentos de geração inicial, sendo locadas a cada indivíduo oportunidades reprodutivas, de algum modo proporcionais às soluções de ajuste dos respectivos indivíduos portadores, para o problema alvo. Serão dadas mais hipóteses de “*reprodução*” e de contribuir para a geração seguinte, aos indivíduos que evidenciem mais proximidade à solução, do que àqueles restantes que resultem em soluções menos adequadas aos fins em busca.

O ajuste que se pretende alcançar referir-se-á sempre a termos relativos, dentro da população que, em cada momento da análise genética, se encontre presente no algoritmo para integrar colaboração nestes procedimentos de abordagem.

1.6.2 Codificação e função de avaliação

O cerne mais activo de um AG é estritamente dependente do problema concreto que se pretenda colocar em análise. Por um lado, engloba um mecanismo de codificação e, por outro, um mecanismo complementar de descodificação/avaliação.

Sendo estabelecido o primeiro mecanismo, função normalmente do tipo de problema que se enfrente, o segundo mecanismo reconstituirá em cada indivíduo os seus termos fenotípicos, aferindo-o em termos de avaliação, através de um termo de referência da análise de adequação, à função em optimização. O fenótipo que se referencia constitui-se como a tradução do código, no seu corpo de aparência pretendida, resultado consequente do genótipo que se representa no código genético. Esta tradução entre código (genótipo) e “*corpo*” (fenótipo) é normalmente intermediada através de um relacionamento algébrico, que necessita porém de possuir univocidade de relacionamento.

A codificação tendo em vista o uso por um algoritmo genético, é normalmente realizada, reduzindo o código a uma cadeia de bits, por cada característica em análise (isto é, zeros e uns, do tipo, por exemplo, 01100101100). Se numa destas cadeias contivermos por exemplo 11 destes elementos, possuir-se-á a possibilidade de

assim se representar $2^{11} = 2.048$ valores discretos diferentes para uma determinada variável em causa na codificação. Normalmente acrescenta-se ao código um carácter suplementar, se se necessitar ter presente o sinal para a variável, isto é, se se tratar de uma variável não exclusivamente positiva ou negativa.

A função de descodificação terá de ter em conta, no cromossoma, isto é no conjunto dos alelos, não só o tamanho que dirá respeito à separação de cada gene individual de codificação evidenciada por uma determinada variável em causa, como também o relacionamento com valores decimais que queiramos que se encontre implicado nas variáveis fenotípicas, através do código que se utilize.

A função de avaliação tem de conseguir realizar uma ordenação da adequação de cada indivíduo da população, de forma célere. Normalmente encontra-mo-nos perante populações que necessitam de ser dotadas de um cardinal significativo de elementos, tendo em vista se evitar fenómenos de convergência precoce e não realista. Os indivíduos, deste modo, podem possuir um número significativo de cromossomas, cromossomas estes que terão de ser permanentemente operados, descodificados e avaliados.

O algoritmo de reconstituição dos termos fenotípicos e de avaliação do ajuste individual necessita de se ver repetido, geração após de geração, nomeadamente porque a população antecessora, geradora da população seguinte, pode, em determinadas implementações de algoritmo genético, ser genericamente eliminada de forma mais ou menos completa. As novas populações, sucessivamente criadas de descendentes, exigem codificações, descodificações, reconstituições e avaliações de ajuste a realizar, muitas vezes, completamente do início, em cada geração que se aborde.

1.6.3 Peso de cálculo contido num AG

Para avaliarmos o peso de cálculo contido num algoritmo genético, assumamos que a interacção entre parâmetros não é linear, como se trata do caso da análise de redes de distribuição de água. O tamanho do espaço em busca é relacionado com o número de bits que usarmos no problema de codificação. Por cada bit de codificação de tamanho L , o espaço do espaço de busca será 2^L e será representado pelo interior de um hiper-cubo. O algoritmo genético amostra na totalidade do interior deste hiper-cubo de dimensão L .

A expressão de “*volume*” deste hiper-cubo cresce exponencialmente em respeito ao valor L , que é o valor do lado da figura geométrica que analisemos. Apenas tendo em vista se entender a dimensão dos cálculos que poderão se encontrar envolvidos num algoritmo deste tipo, se considerarmos que 2^{400} é uma boa aproximação do espaço de busca do quadro possível de soluções do jogo do xadrez (assumindo que a descrição ramificada completa do jogo em cada jogada é de 16 possibilidades e que ocorrerão até ao limite final cerca de 100 jogadas: $16^{100} = (2^4)^{100} = 2^{400}$), constata-se que mesmo que por hipótese absurda todos os átomos existentes no universo

computassem jogadas de xadrez à razão de *pico segundos* por jogada, mesmo que considerássemos o início do cálculo desde o *big bang*, a análise ainda estaria a começar. E a complexidade do jogo de xadrez nem sequer se aproxima, por exemplo, da complexidade inerente à optimização de uma rede mediana de distribuição de água. Ou das, ainda mais complexas, características de adaptação/evolução dos seres vivos ao ambiente circundante.

A forma como o AG ultrapassa as dificuldades de abordagem presentes numa enumeração completa de um espaço amostral que tende para a imensidão de números enormes, onde tipicamente a solução, ou as boas soluções dos problemas são esparsas, em respeito ao espaço de busca, parte do facto de a partir de um determinado valor de dimensão deste espaço, a procura aleatória de soluções se tornar mais efectiva que a busca alternativa por enumeração. A alternativa de enumeração completa do problema, ao se tornar impraticável a partir de certa dimensão do espaço amostral, cede lugar à possibilidade exequível de abordagem deste tipo de problemas por outros métodos não enumeradores. Numa primeira fase por busca aleatória do tipo Monte Carlo. Numa segunda fase, por recorrência aos mecanismos de operação e condução do cálculo que são contidos num AG, que forçarão mais ainda a busca de soluções em determinados sentidos, observadamente constatados como mais convenientes.

Por outro lado, os mecanismos de optimização por enumeração são rígidos em torno da ordenação da procura das soluções. Os AG's, pelo contrário, possuem mecanismos de favorecimento natural da busca sobre sub-domínios de especialidade do espaço amostral, onde se constate a possibilidade de “*sobrevivência*” próxima de soluções de ajuste dotadas de níveis mais elevados de aproximação. As soluções por enumeração completa de problemas, dispersam a procura na totalidade do domínio, não introduzindo nenhum favorecimento que induza a busca nos lugares onde afinal se constate, de algum modo, alguma prodigalidade em soluções que se ofereçam como melhores e maiores probabilidades de serem próximas a pontos ainda mais óptimos e ainda não encontrados.

1.6.4 Implementação de um Algoritmo Genético

O primeiro passo para a implementação de um algoritmo genético é a geração inicial de população. Na formulação genética, cada elemento da população será constituído por uma sequência de caracteres binários de comprimento L , que corresponderão ao problema codificado. Cada conjunto destes caracteres é normalmente designado por “*genótipo*”, ou também por “*cromossoma*”. Após a criação da população inicial, cada conjunto de caracteres de genótipo é avaliado e aferido, segundo uma formulação de ajuste.

Normalmente encontram-se presentes nesta parte do algoritmo dois conceitos, que se configuram como próximos, mas que convirá detalhar de algum modo com suficiente extensão. Por um lado a noção de avaliação e por outro a de noção de

adequação.

A função de avaliação – ou função objectivo do nosso problema – providencia uma medida de resultado, em respeito a um conjunto particular de parâmetros. A função de adequação transforma aquela medida de avaliação, numa locação de ordem, face a oportunidades reprodutivas que aferirão cada indivíduo populacional, face ao mecanismo de reprodução. As avaliações de conjunto de caracteres sobre cada um dos indivíduos, na população, são independentes umas relativamente às outras.

Na forma canónica, a adequação (*fitness*) será definida pela forma apresentada em (1.89).

$$Fit = \frac{f_i}{\bar{f}} \quad (1.89)$$

Nesta equação, f_i é a avaliação associada ao conjunto de caracteres de índice i , e $\bar{f}$ é a média das avaliações de todos os conjuntos de caracteres cromossómicos presentes na população. Mas a adequação também poderá alternativamente ser determinada num elenco ordenado da população, ou por métodos de amostragem, como por exemplo a providenciada por uma comparação em emparelhamento, tipo torneio ou “*match racing*”, etc.

O algoritmo genético deve ser entendido como um processo dotado de duplo estágio. Começa com uma população actual, à qual é aplicado um procedimento de selecção. Esta selecção origina uma população intermédia, à qual são aplicados os operadores de recombinação (também anteriormente designados por, crossover) e mutação, tendo em vista a sua redução para desenvolvimento da geração populacional seguinte. O processo que nos permite passar da população actual, para a população seguinte designa-se por geração, quando se executa um GA. Se apenas abordado desta forma poderemos designar esta formulação como *Algoritmo Genético Simples*.

A variação entre cada uma das alternativas que se podem adoptar para concretização de cada parte constitutiva de um algoritmos genético, face a um problema concreto, normalmente apenas se manifesta em termos da eficiência de funcionamento do algoritmo. Isto é, em termo do número de ciclos ou tempo de funcionamento, tendo em vista obter um determinado nível de aproximação à solução. Não interferindo, contudo, com a solução que se encontre do problema.

1.6.5 Algoritmo a aplicar no âmbito das hipóteses formuladas no âmbito da presente tese.

Dentro do esquema de actuação desenvolvido, múltiplas possibilidades poderão ser articuladas, tendo em vista o objectivo central de fazer derivar a população, no

sentido pretendido de maior nível de adaptação ao problema que se encontra em análise. Na parte respeitante à formulação do problema da presente tese, serão particularizadas as propostas de abordagem da codificação, do mecanismo de avaliação a desenvolver, bem como de formulação e probabilidade de actuação dos operadores de crossover e de mutação.

Dado, no caso da presente Dissertação que se desenvolve, encontrar-mo-nos perante um desenvolvimento de AG que integra duas fases, embebidas num único algoritmo genético, onde se pretende um resultado conjugado sobre uma abordagem única de imbricação geral, a formulação proposta terá de oferecer forma integrada, concebida e explicitada sobre conceitos que transcendem as formas canónicas, já conhecidas para o tipo de algoritmos genéticos.

Os mecanismos suplementares em causa, terão de permitir a integração das diferentes perspectivas de abordagem desenvolvidas, consoante a variável a avaliar, no interior de um modelo matemático e de linguagem de explicitação informática, dotada de um nível de complexidade suplementar, aplicando-se à calibração, no caso, de modelos compostos por duas variáveis interdependentes.

Nomeadamente, será necessário dispor de todo o conjunto de mecanismos de selecção inter-populacional de dados cruzados, perante populações que são colocadas em confronto com uma interferência mútua de avaliação estabelecida, segundo regras que são, por um lado distintas, mas, sobretudo, que se oferecem sobre distintos mecanismos de interferência e de desenvolvimento, sobre o conjunto unitário de fenómeno colocado em análise.

As regras básicas das interferências que se necessitaram de colocar em presença são estabelecidas a partir da colocação do Conjunto Tese, subjacente ao desenvolvimento do presente trabalho de Dissertação. As duas populações que colocamos em presença para resolução conjugada e integrada no nosso modelo dizem respeito a rugosidades, uma, e a consumos nos nós, a outra.

1.7 ELEMENTOS DE DESENVOLVIMENTO COMPLEMENTAR

1.7.1 Análise de frequência, para definição de consumos

A abordagem que se pretende propor e desenvolver, a partir da presente Dissertação, implica interceptar-se espaço de dados, o mais possível dotados de formulação diversificada. Esta perspectiva possui o sentido de viabilizar a obtenção de uma resolução, através de uma análise em período extenso. Neste caso, a metodologia de abordagem do sistema de equações poderá compensar, anulando desejavelmente, a singularidade que é presente neste tipo de equações, quando em abordagem inversa de calibração. Esta matéria já foi, por diversas formas, abordada ao longo do presente desenvolvimento de trabalho, constituindo-se esta circunstância como justificadora da importância da abordagem indicada no presente capítulo.

Na prática, o sistema de equações a calibrar será observado, imaginando-se que a carência de equações que se observe, estruturalmente decorrente da carência de dados do problema de cada momento individual, seja ultrapassada/minimizada, como que tri-dimensionalmente, através da consideração adicional da variável *tempo* ao problema. E onde se justapõem dados provenientes de momentos diferenciados, de forma a se tornar possível a organização da matriz de solução, feita considerando uma latência no tempo dos valores que se encontram em determinação, no que concerne a rugosidades das condutas, e uma variação explicada por formulações contínuas, diferenciáveis, mas também razoáveis, face às características da variável, no que concerne ao consumo nos nós.

Nesta matéria, e dada a metodologia que se vislumbrou como aplicável ao caso da presente análise de sistemas de distribuição de água para o desiderato da calibração, realizada de forma completamente recorrente a uma abordagem informática simulada da realidade, coloca-se a questão de sermos capazes de alimentar o sistema com dados dimensionalmente diversificados, nomeadamente no que concerne ao consumo nos nós. Dados estes que fossem também dotados de características que não só se ofereçam como verosímeis, face às estruturas comuns de funcionamento das redes de distribuição de água a populações realistas, mas ao mesmo tempo que se ofereçam de forma verdadeiramente estocástica e possuídores, à partida, de características estruturais de definição mais ou menos irrepetíveis (ou pelo menos não repetíveis de forma estrutural). Tal qual, aliás, se aparentam os dados reais observados a partir de um esquema de monitorização de uma qualquer rede de distribuição de água.

Este desiderato torna insuficiente a abordagem legal de regulamento, tradicionalmente vigente sobre esta matéria para definição das solicitações em projecto, se aplicada ao modelo que se desenvolve para calibração. Normalmente, na matéria de projecto, a perspectiva onde mais intensamente esta questão tradicionalmente se tem colocado, obedece-se a um enquadramento que organiza os dados por formas

mais ou menos simplificadas e que podem ser assimiláveis à verificação de cenários de envolvimento das solicitações, para determinação/verificação de estádios de funcionamento extremos nos sistemas. Esta abordagem que é suficiente se apenas aplicada ao dimensionamento de redes, efectivamente não é suficiente o bastante para nos permitir ultrapassar os condicionantes que se apontaram na formulação de calibração de sistema, nos termos enunciados para consequência do colocado em Tese.

Na abordagem de dimensionamento, confrontam-se, para a mesma hipótese infra-estrutural de rede, a presença de caudais mínimos, que são possíveis de imaginar por exemplo para períodos do tipo nocturno, ao mesmo tempo que se contrapõe para a mesma infra-estrutura, a possibilidade da presença de solicitações de caudais muito mais elevados, normalmente associados a picos de consumo diários das actividades normais. Justapostos até a ocorrências de solicitações extraordinárias, acidentais, do tipo incêndio, ou outras eventualmente mais gravosas, ou não, mas de ocorrência com cariz esporádico e aleatório.

Mas, no limite, a utilização que cada utilizador individual faz da rede, quando abre uma torneira, é aleatória, redutível a uma abordagem probabilística que engloba um caudal e uma duração de evento, assimilável a um tipo de distribuição do tipo de Poisson.

Esta circunstância implica a não disponibilidade actual de uma formulação para geração de consumos, que origine resultados que possamos utilizar na abordagem indicada das redes de distribuição de água, em simulação estocástica verdadeira, ao mesmo tempo dotada de características verosímeis. Esta perspectiva, no entanto, se desenvolvida, permitiria a realização de uma análise sobre as redes, não só por formas mais aproximadas e consentâneas com o verdadeiro desenrolar da realidade ao longo do tempo de recorrência das análises, como em situação de simulação estendida no tempo, no sentido de se disponibilizar um conjunto de solicitações e de funcionamentos de rede, que permitisse a des-singularização do modelo, mesmo quando colocado em circunstância de carência de dados, relativos aos cenários instantâneos particulares constituintes de um quadro organizado a assim obter.

Assim se constatando, inicia-se neste capítulo um desenvolvimento de uma metodologia de geração de dados de solicitação, que seja aplicável a redes de distribuição de água, e que nos permita alcançar metas de diversificação dimensional, desiderato indicado como importante, no âmbito da presente abordagem de resolução de sistema de equações.

As características de aplicação de modelos de consumo de água, no interior de uma habitação, com características de tipologia especificadas, o consumo de água poderá ser analisado de forma associada a uma distribuição do tipo de Poisson, com parâmetros de média e desvio padrão a determinar.

A generalização da abordagem de um modelo estocástico deste tipo apresentado,

presente nos trabalhos bibliográficos a este tema dedicados, mas particularizados a redes públicas exteriores de distribuição de água, pode ser elaborado sabendo-se que a distribuição de Poisson pode resultar, na presença de um elevado número de habitantes, numa distribuição que seja positiva (os caudais de consumo entender-se-ão sempre, no mínimo, como não negativos), também em consequência da característica de positividade, assimetria e dotada de média e desvio padrão, parâmetros estes que poderemos testar agregados a uma curva do tipo *Log-Pearson tipo III*. Esta curva de distribuição pode ser resumida a três parâmetros, a enunciar: média, desvio padrão e assimetria.

O modelo de calibração desenvolvido poderá ser objectivado para esclarecer as componentes e características concretas de um sistema real de distribuição de água, efectuando em consequência uma previsibilidade geral da sua evolução no tempo, aos parâmetros da curva indicada. Nomeadamente, pela aplicação de mínimos quadrados, ou mesmo de algoritmo genético a este fim dedicado.

Se esta, ou outra curva, se revelar adequada, poder-se-á assimilar valores de uma distribuição uniforme com média e desvio padrão e assimetria, valores a obter por ajuste histórico a determinar, a partir de um modelo que consiga associar probabilidades a distribuições espaço temporais de consumo, de resultado ajustado ao funcionamento histórico e com resultados aproximados ao observado experimentalmente. Isto será, com certeza, a suprema intenção de qualquer modelador de sistemas de distribuição de água no que concerne à previsão de consumos nos nós de uma rede de distribuição de água.

Claro que, também para os nossos objectivos de diversificação temporal de dados tendo em vista a calibração, interessaria que existissem presentes no sistema, também de forma enquadrada pela perspectiva de abordagem de cálculo providenciada pelo desenvolvimento colocado em tese, variações integradas de outros parâmetros globais. Possibilitando a determinação de variações dos parâmetros estatísticos que resultem na solicitação de cálculo de consumo de água sobre a rede ao longo de unidades temporais com características diferenciadas.

Por exemplo, que a sequência de estações do ano, meses, dias da semana e horas fossem identificadas como entidades relativas a realidades com características e parâmetros esperadamente diferentes. Isto é, que o consumo esperado do Verão não será o do Inverno; que o de Janeiro, não será o de Agosto; que o da segunda-feira, não será o do sábado e que; o do meio-dia não será o da meia-noite.

Pretende-se que a própria população presente, e respectiva necessidade de consumo de água, flutue ao sabor do tempo, estocasticamente, segundo padrões definidos, por exemplo, simulando uma variação sazonal (de estação do ano ou relativa a outros períodos de tempo, por exemplo os indicados). Que de forma horária, diária, semanal, mensal e anual, se sinta isso no modelo, ao longo também de uma evolução da demografia, da economia e da geografia, eventualmente em perspectiva macro.

Tudo no sentido de uma verdadeira diversificação das solicitações e simulação mais realista da exploração de redes de distribuição.

Esta abordagem indicada expressar-se-ia de forma potencial sobre o consumo, reflectindo-se através de uma índole variacional da estrutura de dados, com consequências na própria simulação da realidade a ser simulada, a partir de realidades que fossem como que percutidas, por exemplo, através do social e do económico, eventualmente de forma o mais possível semelhante a um aglomerado real que fosse colocado em análise no âmbito da simulação.

Resultará esta abordagem na mais completa diversificação dos dados para análise e calibração. Uma intermediação de simulador, analisado em tempo estendido, seria deste modo possível de se obter.

Desta explicação efectuada resultará que cada entidade objecto de integração no sistema de simulação que se pretende colocar presente no âmbito a desenvolver para verificação mais completa do conjunto de hipóteses colocadas em tese, evidenciará um consumo e uma distribuição geográfica particular, definida através de uma abordagem estocástica, segundo parâmetros que se pretendem que sejam dotados de uma integração vertical, contendo influências somadas relativas mais essencialmente à época do ano, altura da semana e hora do dia. Mas também de outros conjuntos de influências possíveis de imaginar, por exemplo, de variações socio-económica ou cultural, macros, e que resultem em variações de solicitação verosímeis de compreender sobre o modelo.

1.7.2 Tratamento probabilístico de dados

Uma *variável aleatória*, X , entende-se como uma variável que, não sendo determinística, é passível de ser descrita em termos de uma probabilidade de distribuição. Uma *distribuição estatística* é uma função matemática que é relativa a uma determinada variável aleatória, e que especifica a possibilidade que uma determinada observação dessa variável poder se enquadrar numa determinada limitação de conjunto.

No caso em análise na presente Dissertação, as nossas variáveis aleatórias em presença poderão ser constituídas pela população de base associada ao sistema, bem como o consumo de água que seja equacionável, em cada momento, a cada elemento populacional.

Deste modo, quer a população quer o consumo poderão possuir uma função de distribuição somativa, que seja estabelecida de forma relacionada quer no que diga respeito à necessidade de consumo em cada momento, como face a uma distribuição desse mesmo consumo global, particularmente sobre cada nó da rede, ao longo do tempo.

Considerar-se-ão apreendidos os conhecimentos relativos a tratamento probabilístico de dados e espaços de distribuição estatística, incluindo-se os conceitos gerais

da matemática, estatística e probabilidades, como sejam população, amostra, espaço amostral, probabilidade de acontecimento, álgebra das probabilidades, probabilidade total, probabilidade complementar, probabilidade condicional, reunião de probabilidades, etc.

1.7.3 Função de frequência e de probabilidade

Num sentido definido directo, se partirmos de exemplos extensos de amostras e pretendermos a partir daqui determinar os valores que sejam atribuíveis aos parâmetros característicos de uma determinada distribuição de probabilidade que se encontre associada a estes mesmos dados, poderemos, como indicado, recorrer quer a métodos gerais, como os mínimos quadrados, quer a métodos de optimização, do tipo genéticos, cuja aplicação de ambos se encontra efectuada em parte própria da presente tese.

Dado que se demonstrou com mais potencialidade de ajuste ao presente desenvolvimento a curva de *Pearson tipo III*, efectua-se seguidamente uma sua especificação mais detalhada.

Distribuição de *Pearson tipo III*

A curva de distribuição de *Pearson tipo III*, expressa-se pela fórmula (1.90).

$$f(x) = \frac{\lambda^\beta (x - \varepsilon)^{\beta-1} \times e^{-\lambda(x-\varepsilon)}}{\Gamma(\beta)} \quad (1.90)$$

A equação envolvida possui 3 parâmetros para sua definição; λ , β , ε , bem como a função $\Gamma(\beta)$, que representa a expressão da função *Gama*, definida pela equação (1.91).

$$\Gamma(\beta) = \int_0^\infty u^{\beta-1} e^{-u} du \quad (1.91)$$

Este conjunto de parâmetros indicados pode ser assimilado, como anteriormente indicado, respectivamente a uma média, um desvio padrão e uma assimetria da curva, constituindo-se estes valores, dimensionalmente, como momentos de grau 1, 2 e 3 da função, respectivamente.

1.7.4 Formas alternativas de ajuste

Para alguns casos, poder-se-á pretender que o ajuste agora colocado em causa de se realizar, seja efectuado, não por uma curva de relacionamento fixa entre variáveis, mas sim por uma função de distribuição que melhor se ajuste ao conjunto de dados

observados. Nestas situações, podem ser equacionados outros métodos que não a regressão linear ou os algoritmos genéticos, já indicados como capazes de abordar o problema para a concretização deste outro objectivo, como será o caso dos métodos dos momentos, curtis, etc.

Também a aplicação da teoria dos números imprecisos (“*fuzzy sets*”), poderá se constituir como caminho a investigar para operacionalidade dos objectivos anteriormente enunciados para o desiderato de obtenção de consumos diversificados. Eventualmente cruzando este método com o providenciado pelos AG, algoritmos evolucionários (AE), etc, e isto, quer se tenha a perspectiva de alimentação do modelo de calibração presentemente proposto, quer se pretenda obter dados previsionais futuros de solicitação, ou o diagnóstico, através da observação de discrepâncias entre o previsto e o observado do momento presente de exploração das redes.

Em relação à importante questão da definição de consumos de água, ao longo do presente desenvolvimento de trabalhos, pretender-se-á desde logo os assimilar a funções que possuam distribuições de frequência que sejam positivas, dotadas de média, desvio padrão e assimetria.

Sem se ter avaliado previamente a validade desta perspectiva, e sem capacidade portanto de questionar a razoabilidade desta posição em termos de realidade do conjunto de opções que se efectua, os fenómenos de consumo serão preconizados dentro de formulações assimiláveis, de forma geral, a curvas do tipo *Pearson de tipo III* apresentadas em parágrafo anterior e como já indicado.

Esta família de curvas (e/ou outras), necessitará/ão, para o fim indicado, de ser objecto de um desenvolvimento num âmbito específico de aplicabilidade prática, que permita conclusões seguras para relacionamento entre parâmetros, curvas consequentes e consumos observados/observáveis. Para este fim será necessário dispor-se de uma avaliação entre abordagens de regressão e projecção linear ou métodos gerais (explícitos, implícitos, ou de optimização), e funções de distribuição do tipo uniforme, indicadas.

Esta pesquisa que se sugere, estima-se ser viável e abordável, se se dispuser de tempo que, a isso, seja dedicado. Pensa-se com o desenvolvimento proposto, poder-se obter respostas tipificadas, por um modelo, do consumo em nós de redes de distribuição de água, que possuam formas apropriadas para melhor alimentação de um simulador de protótipo, a utilizar como gerador de dados de modelos de redes que necessitem verdadeiramente de alimentação estocástica e realista, como também previsor de consumos e meio complementar de diagnósticos.

Os parâmetros que se considerarão mais significativos para se obter cada um dos consumos instantâneos a considerar na rede de distribuição deste sistema, e relativos a cada momento que se pretenda modelar, serão:

i) População presente;

A definição de população presente para cada instante a simular, será realizada considerando existir uma função de variação exponencial contínua desta variável, relativa ao ano e dia em curso na simulação, de maneira que a possamos considerar representativa, em termos médios agregados globais, para a população ao longo do tempo. Este objetivo é concretizado através de uma mudança de variável logarítmica, de linearização da população.

ii) Capitação de consumo de água;

A definição de capitação de consumo de água considerará que o valor médio de consumo dos indivíduos presentes será afectado por um regime de progressão (crescimento), possuidor de um relacionamento temporal de idêntica profundidade que o anteriormente definido para a população presente, isto é, relativo ao ano e dia em causa de abordagem.

iii) Variabilidade de consumo diária;

A esta variação corresponderá um factor, em diagrama fixado para o aglomerado, da variação média entre a capitação média diária anual e a capitação horária constitutiva, ao longo das 24 horas do dia.

iv) Variabilidade de consumo semanal;

A esta variação corresponderá um factor, em diagrama fixado para o aglomerado, de variação média entre a capitação média diária anual e a capitação de cada um dos diferentes 7 dias da semana, de domingo a sábado.

v) Variabilidade de consumo anual.

A esta variação corresponderá um factor, em diagrama fixado para o aglomerado, de variação média entre a capitação média anual e as capitações médias mensais de cada mês, de Janeiro a Dezembro.

Ao longo da modelação, cada um dos parâmetros de base apresentados (população presente, capitação de consumo de água, e os factores de variabilidade de consumo, diário, semanal e anual), serão individualmente afectados a cada nó, tendo em conta os valores pesados de influência respectiva, baseados no comprimento que seja influente de cada conjunto de tubagens, em cada nó.

O somatório de cada um dos conjuntos individuais de factores relativos às horas do dia, dias da semana e meses do ano para simulação para determinação dos consumos de água (contidos em tabelas diárias, semanais e mensais, relativas aos factores de variabilidade diária, semanal e mensal, respectivamente), corresponderá, de forma exacta, à unidade do respectivo valor médio de base a que for relativo. Esta fase do cálculo pretende estruturar os consumos em torno de padrões básicos de expressão.

O conjunto de tabelas de variabilidade a utilizar expressar-se-á segundo quadros de variação que se possam julgar adequados, ou avaliados por ajuste a redes reais, se for o caso.

Cada um dos valores que se determinem em termos de valor de base, incluindo-se desde logo também o que for relativo ao peso relativo de cada nó na rede, intermediará os valores a utilizar de forma efectiva como dado de consumo. Este mecanismo desenvolver-se-á por recurso a distribuições como a indicada, de *Pearson tipo III*, por exemplo.

O valor final de consumo será obtido da multiplicação individual de todos os valores anteriormente referenciados, aferidos para cada nó da rede, logo após a intervenção dos filtros estocásticos indicados, correspondentemente aplicados.

O somatório dos pesos a aferir a cada nó da rede, determinados em termos finais, isto é, após a intervenção do filtro estocástico, será em média igual à unidade. Mas compreende-se que cada valor possa oferecer valores de distribuição, relativos a cada uma das simulações efectuadas.

A metodologia para conseguir esta circunstância pode ser alcançada através de uma qualquer distribuição contínua que possua média unitária e variância, como é o caso, por exemplo, da distribuição normal, ou constante num intervalo simétrico em torno da unidade.

Do modo indicado o valor da distribuição de peso que cada nó ofereça, dentro de uma mesma simulação pode não possuir necessariamente um somatório igual à unidade. O valor de soma presente que se preconiza, apenas pretenderá ser, em média, unitário.

A modelação proposta sobre os pesos dos nós da rede pretende integrar no modelo de geração de consumos, as migrações rápidas e aleatórias que podemos assimilar, numa rede real, a deslocações de consumidores, dentro das fronteiras da rede de distribuição, como entre o interior e o exterior da zona geográfica em análise.

1.7.5 Justificação do desenvolvimento realizado.

Os termos relativos aos pontos iii), iv) e v), anteriormente enunciados, integram implicitamente os tradicionais factores de ponta, diário, semanal e anual, linguagem que mais normalmente se utiliza para a compreensão de cenários de envolvente e de dimensionamento corrente de redes de distribuição de água.

O desenvolvimento da determinação de consumos por esta outra forma estocástica que foi explicada, decorre de ser manifesto que na abordagem inversa de calibração, as possibilidades de abordagem por meio de factores de ponta singelos se tornaria insuficiente, como já explicada razão. Não se dispondo de dados suficientemente diversificados, não se permitirá uma análise de intercepção de equações adequada, segundo as hipóteses de abordagem do sistema formuladas no âmbito da aplicação do conjunto de hipóteses colocadas em Tese.

A formulação computacional proposta e preconizada, que foi desenvolvida e apresentada, tenta corresponder a necessidades específicas do “*traqueamento*” do simulador de protótipo de rede, a utilizar. A maneira indicada, permitirá uma sequenciação de consumos de água sobre cada nó da rede de distribuição, que seja não só capaz de oferecer uma razoabilidade e mimetismo mínimo, face a funcionamentos esperados de uma rede real de distribuição de água no seu dia-a-dia de exploração, mas, sobretudo, que ofereça à análise contínua do sistema uma distribuição dimensional para se permitir, o mais possível no nosso caso, a anulação de singularidades que observamos e compreendemos presentes no objectivo e sistema de equações, para calibração de redes de distribuição de água.

1.7.6 Coeficiente de correlação

O coeficiente de correlação representa uma medida do grau de ajuste de uma determinada curva a um conjunto particular de pontos. Considera-se que possua o valor 1, no caso de todos os pontos coincidirem com a curva que se seleccione. O coeficiente de correlação a obter sobre calibração de modelos será parcial, dado dizer respeito a ajustes realizados a dados de amostragens que também são parciais.

1.7.7 Análise de sensibilidade

Os modelos matemáticos pretendem, como objectivo essencial, estabelecer o relacionamento entre uma certa formulação matemática, e um determinado fenómeno da natureza. A importância de um modelo matemático reside, desta sua essência, no facto de podermos verificar nele uma razoável previsão, que relacione os seus dados e os seus resultados, com aquilo que, nos seus termos equivalentes, possa ser observado no fenómeno natural que o modelo pretenda representar.

Um modelo matemático perspectiva a realização de dois tipos de análises. O primeiro, interior, que concerne ao relacionamento mútuo entre as representações matemáticas, as definições e hipóteses, para desenvolvimento de um relacionamento representativo adequado do fenómeno natural a modelar. O segundo, exterior, define-se por intermédio de um relacionamento geral entre dados e resultados, que poderão se referir quer ao modelo, quer ao protótipo, da natureza que esteja sob estudo.

Destas duas abordagens, a primeira orienta a concepção e o desenvolvimento da modelação, ela própria, entendida como uma estrutura matemática formal de transformação de dados em resultados. Ou vice-versa, de resultados (transformados em dados do modelo inverso) em dados (transformados em resultados do modelo inverso). A segunda abordagem, pretende a verificação e a validação do modelo, face aos respectivos equivalentes observados na natureza. Fornece, sobretudo, um quadro de relacionamento entre ambos os lados e sentidos cruzados (directo e inverso) de

funcionamento, quer de modelo, quer de natureza.

A abordagem reduzida apenas ao lado exterior e relativa à influência de variação de dados e de resultados, quer aplicada ao modelo matemático, quer ao fenómeno da natureza, quer ao sentido directo quer inverso do modelo, colhe a designação geral de análise de sensibilidade.

Análise de sensibilidade aplicada, em concreto, a redes de distribuição de água

Como abordado nos dois capítulos próprios da presente dissertação, relativo, um, à hidráulica e, o outro, à qualidade e traços, a modelação de redes de distribuição de água baseia-se no conhecimento da função de resistência do escoamento e da continuidade nos nós, numa formulação de energia mínima para a hidráulica e, a outra, resultando nos valores de decaimento e concentração, de qualidade e traços, para ambas estas análises, ao longo da geometria e dos sucessivos momentos de explanação do fenómeno do escoamento nas redes.

As formulações que se desenvolveram, constataam-se implícitas para o caso físico-hidráulico primeiramente indicado, e obtidas através de uma simplificação físico-química e geométrica, significativa, no caso da modelação de qualidade da rede.

Também o encadeamento dos factos decorrentes da formulação de qualidade depender de uma análise da hidráulica do sistema, e a hidráulica do sistema exigir uma explanação implícita de relacionamento entre as variáveis de caudal e de resistência, implicam a presença, neste tipo de sistemas, de uma complexidade que impede a sua resolução (directa ou inversa), fora de quadros particulares de conhecimento das variáveis. Esta circunstância já foi explicada, por diversas maneiras e segundo diversas perspectivas de abordagem, ao longo da presente dissertação.

Se a rede de distribuição de água dispuser de n nós e t tubagens, já se identificaram nela:

- i) t incógnitas, relativas a rugosidades;
- ii) t incógnitas, relativas a caudais (ou velocidades, dado o relacionamento estabelecido destas, através dos diâmetros);
- iii) n incógnitas, relativas a pressão nos nós (ou t perdas de carga em tubagens, linearmente dependentes com as pressões);
- iv) n incógnitas, relativas a consumos nos nós,

o que somou $2n + 2t$ variáveis hidráulicas, no total. Mas, a esta contagem, poder-se-á acrescentar t variáveis relativas ao decaimento de qualidade ($t + 1$, se se considerar a separação entre decaimento central e de paredes). Deste modo, o total

de variáveis que se poderão considerar para a análise de sensibilidade de um sistema de distribuição de água, poder-se-á assim computar em $2n + 3t + 1$.

Para o caso de se pretender abordar o dimensionamento de uma infra-estrutura de distribuição de água, o conjunto global de variáveis que se apresentou reduz-se, considerando-se conhecidas as $2t + 1$ incógnitas de rugosidade e de decaimento de qualidade, bem como as n incógnitas de consumo previstos para os nós. Isto é, o conjunto destas variáveis passa a ser definido, à priori, resultando na necessidade de determinação, apenas, de $n + t$ variáveis para esta circunstância. A primeira parcela desta soma será relativa às n pressões nos nós e, a segunda, aos caudais (ou diâmetros) das (nas) t tubagens, que se desconhecem no sistema.

O sistema apresentado ficará univocamente determinado, dado se dispor de n equações para o fim em vista, e a atribuição dos t diâmetros que se envolvem na concepção da rede se efectuar, pretendentemente, sujeita à intercepção de objectivos de optimização técnico-económicos.

Todavia, se o problema for, de outro modo, o de calibração de uma rede de distribuição de água, isto é, exactamente o conhecimento inverso do perspectivado para o dimensionamento, abordado no parágrafo anterior, permanecerá uma presença formal de outro conjunto de incógnitas, sendo aqui, em princípio, apenas conhecidos, de forma directa, o conjunto de diâmetros instalado, a topologia da rede e a circunstância de estado dos dispositivos de controlo. Adicionalmente pode-se considerar a disponibilização, de forma sempre limitada, de dados de pressões, de caudais ou de análises de qualidade, realizada de forma mais ou menos pontual, em perspectiva de amostragem. Dados estes determinados de forma mais ou menos extensa e organizada no tempo, ou mais ou menos esparsa, sobre os diversos locais geográficos da rede de distribuição dos fenómenos em causa de estudo e momento temporal de funcionamento.

É pela presença destas circunstâncias, com implicações matemáticas sobre a resolubilidade do sistema envolvido, que a designada determinação inversa do modelo (ou calibração, se em circunstância de dados insuficientes, o que sendo a circunstância mais usual será, de sobremaneira, a abordagem mais complexa de compreender e de executar sobre redes de distribuição de água) foi seleccionada como o principal objectivo de desenvolvimento da presente Dissertação. No caso real e para calibração, o explorador das redes encontrar-se-á, permanentemente, na situação de uma disponibilização limitada de dados de funcionamento do sistema natural que explora, sempre insuficientes e resultantes em soluções dotadas de multi-dimensionalidades, árduas ou mesmo impossíveis de superar sem a consideração de condicionantes independentes suplementares.

Dada a presença das dificuldades indicadas no desiderato mais central que se pretende abordar, a análise de sensibilidade para o nosso modelo será desenvolvida essencialmente dirigida para a calibração. No sentido principal de se poder constituir

como uma ferramenta que conceba e oriente a aplicação das formulações em tese, desenvolvidas como súmula do presente trabalho de dissertação.

A análise de sensibilidade, nos termos definidos, providencia uma ferramenta suplementar, que organiza a definição interior de relacionamento do modelo. Trata-se assim de um relacionamento estruturado entre as variações cruzadas dos parâmetros, em equação no modelo da rede de distribuição de água. Como ferramenta analítica, esta dimensão de análise constituir-se-á como um relacionamento diferencial global, entre cada uma das variáveis de dados do modelo, e o conjunto de resultados presentes na modelação (real ou matemática) do sistema.

Em termos hidráulicos gerais, uma rede de abastecimento de água com n nós, satisfará a equação já anteriormente apresentada em (1.56). Esta equação pode ser novamente apresentada de acordo com a configuração considerada em (1.92),

$$F_j = b_{1j}(h_1 - h_j) + b_{2j}(h_2 - h_j) + \dots + b_{(n-1)j}(h_{n-1} - h_j) + b_{nj}(h_n - h_j) + Q_{ej} = 0 \quad (1.92)$$

com j a progredir de 1 até n , e os índices b 's oferecendo-se com determinação unívoca e não nula, apenas enquanto representantes de t possíveis ligações de caudais não nulos, presentes entre a globalidade de nós i e j da rede (por convenção de sinais, os índices b 's serão positivos quando presentes caudais com sentido de i para j , na tubagem $\vec{ij}$ e Q_{ej} será positivo quando represente um sentido de fluxo para fora da rede).

Segundo adoptado por Shamir (1968) [212], a análise de sensibilidade de redes de distribuição de água inclui e encontrar-se-á interessada na investigação da variação que possa ser observada nos resultados do modelo, a partir da variação de apenas uma das variáveis.

Este estudo pode ser representado pelo conhecimento/determinação das derivadas do tipo que é representado por $\partial x_i / \partial y_k$, em que as variáveis $x_i \in X$ e $y_k \in Y$, se poderão oferecer genericamente como pressões, consumos, qualidade, factores de resistência ou factores de decaimento de qualidade, observáveis na rede de distribuição de água, e y_k se constitui como a variável sobre a qual se pretenda possuir/conhecer/determinar consequências da variação e da sensibilidade.

O conjunto X integrará as variáveis independentes que se encontrem presentes no sistema, e o conjunto Y , em sucessão, o conjunto completo de variáveis do sistema a analisar. No primeiro conjunto apenas se incluirão as variáveis independentes, porque as restantes, e respectivos relacionamentos entre si e de sensibilidade, serão obtíveis por um outro relacionamento formal matemático (ou de diferenças finitas, no caso da presença de circunstâncias impeditivas da explicitação e derivação dos relacionamentos em causa), e relacionado (s) com as anteriores, independentes,

através do modelo matemático desenvolvido (ou da observação da natureza que o modelo pretenda representar de forma válida, caso não se esteja perante um modelo formalizado).

Do modo enunciado e no caso de redes de distribuição de água para calibração, perante a disponibilidade no modelo de um sistema de equações que comporte exactamente $2n + 2t + 1$ equações, relativas respectivamente a $2n$ incógnitas de pressão e consumos nos nós, e equações relativas a rugosidades, “*wall decay*” e “*bulk decay*”, os parâmetros que normalmente se encontram em abordagem de calibração nas tubagens, para cada uma das variáveis de tipo presentes no sistema, poderemos deste modo seleccionar este máximo indicado de $2n + 2t + 1$ variáveis de tipo x_i , que se poderão oferecer de forma independente.

A questão da sensibilidade de cada variável, quando avaliada perante si própria, isto é a relação de dependência apresentada para o conjunto X sobre Y , não necessitar de incluir a própria variável x_i colocada no conjunto Y . Este relacionamento já se considera conhecido de forma trivial por, perante a unicidade e monotonia geral dos relacionamentos presentes, já demonstrados, oferecer a óbvia solução unitária.

Cada conjunto de $2n + 2t + 1$ variáveis independentes que pretendamos seleccionar para conjunto de resultados, terá de ser parcimoniosamente escolhido, tendo em conta os relacionamentos de dependência de relacionamento topológico, local e global, que estruturalmente se organizam no desenvolvimento do modelo matemático, incluindo-se nesta conta, de forma global, quer relacionamentos hidráulicos ($2n + t$), quer relacionamentos de qualidade e traços ($t + 1$).

Esta situação resulta localmente, para cada subconjunto definido de par de nós e a tubagem respectiva de ligação entre ambos, de se encontrar um total de quatro variáveis hidráulicas e duas variáveis de qualidade potencialmente desconhecidas. Uma das variáveis de qualidade (a “*bulk decay*”) diz respeito a um parâmetro global e, em princípio, universal do sistema. A geometria descrita apenas dispõe, de forma independente, de três relacionamentos hidráulicos e dois relacionamentos de qualidade. Separando as variáveis descritas em hidráulicas e de qualidade, obtemos para relacionamento das dependências envolvidas:

A - Em termos de relacionamento hidráulico do sistema:

- i) Definidas as duas pressões nos dois nós e o factor de resistência, torna-se dependente a variável a observar para caudal na tubagem;
- ii) definidos uma das pressões num dos nós, o factor de resistência e o caudal, torna-se dependente a variável de pressão a observar no outro nó;
- iii) definidos o caudal e as duas pressões nos dois nós, torna-se dependente a variável a observar para factor de resistência.

Em termos de análise de qualidade, o fenómeno de decaimento da qualidade depende de forma indirecta do caudal (ou, mais propriamente, da velocidade e do diâmetro da tubagem), bem como de interferências complexas entre decaimentos centrais e decaimentos de superfície da tubagem, intrínsecos às formulações físico-químicas e hidráulicas dos fenómenos explicadas. Deste modo, e conhecendo-se à prior a variável caudal como determinada para a tubagem, obtida a partir de um relacionamento hidráulico prévio, obtém-se:

B - Em termos de relacionamento de qualidade do sistema:

- i) Definidos o factor de variação da qualidade e a qualidade num dos nós, resulta de forma dependente a variável de determinação de qualidade no outro nó;
- ii) Definidas as qualidades em ambos os nós, torna-se dependente a variável de variação da qualidade ao longo da tubagem;
- iii) Conhecida a variável de decaimento global “*bulk decay*”, através de uma determinação analítica laboratorial, permite-se a obtenção da complementar “*wall decay*”, através de uma relação de subtracção calibrável.

A formulação da sensibilidade, considerando a expressão geral presente no modelo de distribuição de água representado na equação para este fim indicada em parágrafo anterior, bem como os cuidados relativos às considerações relativas às relações de dependência, presentes localmente entre as variáveis do sistema, é a seguinte matriz extensa expressa em (1.93).

$$\frac{\partial F_j(x_i)}{\partial y_i} = b_{1j}(h_1 - h_j) + b_{2j}(h_2 - h_j) + \dots + b_{(n-1)j}(h_{n-1} - h_j) + b_{nj}(h_n - h_j) + Q_{ej} = 0 \quad (1.93)$$

Se sobre esta equação se considerar o objectivo de se obter as derivadas parciais da equação supra explicitada, relativamente ao conjunto de variáveis y_k , poderemos desenvolver o relacionamento matemático (1.94).

$$\frac{dF_j}{dy_k} = 0; \quad c/ \quad j = 1 \dots n. \quad (1.94)$$

A derivada total desta equação (1.94), resulta, de forma composta a partir de derivadas parciais, na equação (1.95).

$$\frac{\partial F_j}{\partial y_k} + \sum_{x_i \in X} \left(\frac{\partial F_j}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial y_k} \right) = 0; \quad c/ \quad j = 1 \dots n. \quad (1.95)$$

Esta equação (1.95), pode ser escrita na forma matricial indicada em (1.96).

$$\left[\frac{\partial F_j}{\partial x_i} \right] \times \left\{ \frac{\partial x_i}{\partial y_k} \right\} = \left\{ -\frac{\partial F_j}{\partial y_k} \right\} \quad (1.96)$$

Nesta equação, o indicado entre parêntesis recto representa matrizes e o entre chavetas, vectores coluna, encontrando-se condensadas as $2n + 2t + 1$ equações presentes no sistema de equações da rede, sistema onde se incluirão igual número de derivadas parciais desconhecidas do tipo $\partial x_i / \partial y_k$.

As derivadas parciais $\partial F_j / \partial y_k$ e $\partial F_j / \partial x_i$, são calculadas utilizando-se valores obtidos da solução de rede em equilíbrio hidráulico. A selecção do conjunto de variáveis independentes X , faz-se utilizando-se critérios de independência entre si, utilizando-se os critérios que já foram anteriormente descritos de forma geral para a escolha das variáveis que se pretendam (ou sejam) desconhecidas, na análise de redes.

A análise de sensibilidade, do modo explicado, estabelecerá o valor que a variação unitária imposta y_k , provocará a x_i , enquanto apenas todos os restantes $x \in X$ são permitidos de se modificarem. Os valores, no caso de redes de distribuição de água são obtidos de forma aproximada, dado se encontrarem presentes derivadas relativas a relacionamentos implícitos e não deriváveis analiticamente, sendo abordadas por relacionamentos derivados de formulações realizadas por diferenças finitas.

Como aplicação da avaliação da sensibilidade, constata-se que os resultados desta análise providenciam uma maneira válida e rápida de se obter, nomeadamente em modelação de redes de abastecimento de água e por diferenciais finitos, conveniente quadro de comparação dos efeitos que variações de variáveis possam de realizar sobre as restantes, mesmo que, neste caso, relativo a quadros de cálculo pontuais e locais de variação.

Capítulo 2

Tese

2.1 EQUAÇÃO TEÓRICA DO PROBLEMA

Calibrar um modelo matemático de um sistema de distribuição de água significa, de forma essencial, poder dispor-se de uma estimativa fundamentada, e o mais aproximado possível e de forma extensa, daquilo que seja observado na rede para os diversos parâmetros e dados de estado do seu funcionamento. A qualidade de uma calibração implica, de forma inversa, com a distância que se observe entre os resultados do modelo e a multiplicidade de observações que a realidade da rede torne possível de encontrar.

Normalmente, a abordagem de calibração incide sobre o conjunto de dados de rugosidade e de consumo nos nós. Mas também pode ser, com idênticas propriedades e resultados, concretizada para os diversos parâmetros de qualidade (análise de traços) presente na rede de distribuição e para estados transitórios de funcionamento das redes.

Aliás, as extensões contidas nestes outros tipos de abordagem da calibração poder-se-ão constituir como aplicações futuras do presente trabalho, integradas e ultrapassadas que sejam as dificuldades ainda presentes nesta matéria para permitir o alcance prático deste objectivo.

O ajuste entre modelo e protótipo que se pretende desenvolver no presente trabalho, em termos de calibração de redes, implica um conhecimento inferido, isto é, não medido de forma directa, mas obtido indirectamente, de forma inversa, implícita, explícita ou optimizadamente, no equacionamento do problema, isto é, sobre as características hidráulicas, de qualidade e mesmo topológicas da rede. Significa tal, que os dados que se pretendem calibrar terão de se ajustar a cenários, o mais alargados possíveis, na exploração das redes, permitindo que a calibração, bem como o diagnóstico de circunstâncias de funcionamento das infra-estruturas que divirjam das informações compiladas anteriormente para a estrutura, possam decorrer num clima de confiança, consequência de uma validação prévia que se consiga envolver nos resultados.

Daqui resulta a importância das respostas que um mecanismo de calibração de redes de distribuição de água consiga protagonizar para as circunstâncias normais de gestão técnica destas infra-estruturas, conforme abordado aliás na introdução da presente dissertação, nomeadamente para o desiderato de reabilitação de redes de distribuição de água.

A qualidade de uma calibração observa-se, directamente, do ajuste do modelo aos dados conhecidos de funcionamento do protótipo. Mas, nos termos operacionais de uma qualquer rede de distribuição de água, as calibrações desenvolvidas podem servir também, nomeadamente, para a previsão de estádios de funcionamento, diagnóstico de avarias, identificação de situações anómalas gerais, de melhor conhecimento de estado da rede e prognóstico quer de solicitações, quer de respostas respectivas de funcionamento do protótipo.

O objecto que se pretende colocar como central na presente dissertação será, exactamente e como por diversas vezes indicado, o estabelecimento de uma formulação sistemática que permita, de forma extensiva, a determinação de valores de calibração para redes de distribuição de água.

Os corolários que se pretendem inferir da abordagem sugerida pelas hipóteses colocadas em tese, e respectivas implementações de abordagem, querem indicar um sentido de explanação unificada de critérios, que englobam a amostragem de dados, a distribuição geográfica de acessórios para controlo e as metodologias para determinação de estádios de exploração, projecto, avaliação de desempenho, prognóstico, etc.

2.2 FORMULAÇÃO DAS HIPÓTESES DA TESE

As hipóteses colocadas na presente dissertação, que aborda como sempre sublinhado o problema da modelação matemática e da calibração de redes de distribuição de água, assentam de forma apriorística, essencialmente, em duas hipóteses. Ponderam-se as mesmas não só no sentido da obtenção dos objectivos que são formulados para o sistema, como anteriormente enunciado para a calibração dos sistemas de distribuição de água, mas também do ponto de vista físico e da realidade sensível do problema.

Estas hipóteses são:

- 1) A rugosidade presente nas tubagens de redes de distribuição de água deverá ser entendida como possuindo características de constância no tempo, ou, no mínimo, oferecendo velocidade de variação em deriva suficientemente baixa para podermos considerar os valores observados, em períodos de tempos de simulação suficientemente extensos, como constantes;**
- 2) As variáveis de solicitação de consumo, que se definirão e se pretendem obter em cada nó e para cada momento pelo procedimento que se desenvolve, gerar-se-ão segundo formas de distribuição probabilísticas e de variação de valores dotadas de parâmetros assimiláveis a funções contínuas e diferenciáveis no tempo e aplicadas a cada consumo de nó.**

De facto, entende-se ser razoável que uma rede de distribuição de água possua, ao longo de períodos alargados de tempo, uma constância das características das rugosidades no conjunto das suas tubagens constitutivas. Nesta hipótese, até poderá ser expectável que as rugosidades e restantes características de infra-estrutura assimiláveis das tubagens, possam se alterar, mesmo por contribuições que se sabem presentes nas próprias características físico-químicas da água e de envelhecimento intrínseco dos materiais constitutivos das condutas.

De qualquer modo, será razoável que a mudança de parâmetros que eventualmente se constate, se processe obedecendo a determinados padrões evolutivos, de forma progressiva e extensiva no tempo. Em períodos de análise ainda suficientemente longos, continuará razoável entenderem-se como verdadeiras as hipóteses formuladas no presente âmbito e relativas aos procedimentos de calibração dos sistemas.

2.2.1 Abordagem

Por questões que se prendem com a exequibilidade, no presente momento, do modelo, a implementação do algoritmo genético de optimização utilizará apenas distribuições aleatórias, mas constantes no tempo, de consumos nos nós da rede. Esta circunstância não penaliza o equacionamento do problema, que apenas exigirá teoricamente a presença de uma multiplicidade dimensional dos dados que, do modo que se implementou, não exigirá o desenvolvimento de todas as questões complementares, de assimilação dos consumos a funções contínuas e diferenciáveis no tempo aplicadas a cada nós, como proposto na Tese. Esta matéria também já se indicou como possuidora de potencial relevância para investigação posterior complementar, utilizando, como matriz de base o conjunto de hipóteses formalizado em tese.

Esta perspectiva, para além da simplificação da parte do programa informático que rastreia o funcionamento do protótipo, não penaliza a multi-dimensionalidade que se necessita presente na análise. O caminho realizado abre trajecto para a realização de análises porém mais sofisticadas, de implementação da presente abordagem, quer sobre um modelo quer sobre uma rede real, complementando a análise desenvolvida com variacionais sobre os dados de consumos, qualidade, traços e transitórios hidráulicos.

A calibração que se pretende alcançar, resultará da conjugação cruzada dos dois tipos de inter-influências, a levar a cabo, de forma simultânea e em permanência, entre os dados de rugosidade, determinados extensivamente no tempo, e os consumos nos nós, determinados a partir de dados instantâneos.

A primeira das abordagens indicada, é considerada a partir de uma análise em período extenso de simulação (PES) e, a segunda, aferida para cada instante a partir da simulação correspondente, já considerando contudo a determinação anteriormente realizada para o óptimo das rugosidades, conduzida através da indicação obtida pela mediação da parte extensa anteriormente descrita no ponto anterior e também correspondente do mesmo algoritmo genético.

Como abordado, promove-se uma fixação interdependente de soluções para os dados em determinação, recorrendo-se ao mecanismo de calibração que se descreve, obtendo-se os valores por intermédio dos dois mecanismos diferenciados de abordagem que se enunciam. Resolvem-se, numa das fases da perspectiva explanada, a parte das incógnitas relativas à rugosidade das tubagens, pretendendo-se, na outra das fases indicadas, obter-se o respeitante aos consumos nos nós.

Em termos de exemplificação, sobre um sistema prático mais compreensível, no método utilizado para avaliação da operacionalidade do conjunto colocado como hipóteses da presente tese, as rugosidades e os consumos nos nós, comportar-se-ão, dentro do algoritmo genético, como se correspondessem a distintas populações de distintas espécies, mas compartilhando o mesmo *habitat* e correspondendo a estádios da cadeia alimentar imediatos. Isto é, simulou-se aquilo que num ecossistema animal

vivo, se pode observar na adequação, por exemplo, entre herbívoros, em escapar aos seus predadores, e, carnívoros, em caçar as suas presas, num ecossistema. Observa-se, no sistema vivo, uma interligação entre as adequações mútuas, que são de forma inter-ligada dependentes entre si, circunstância que se pretendeu mimetizar de forma correspondente no algoritmo genético implemento. E simulando-se deste modo a inter-influência da adequação mútua do conjunto de ambas as variáveis, nos termos preconizados pela tese.

Para cada uma das finalidades particulares enunciadas, utilizaram-se como dados a resolução de conjuntos extensos de valores instantâneos da fase complementar (de consumos, quando em relação a rugosidades, e de rugosidades, quando relativa a consumos). Para a abordagem dos consumos e das rugosidades do protótipo, recorre-se a uma fixação inicial, de forma antecedente e aleatória, definindo-se deste modo a inicialização do processo de optimização e busca interligada contida no cálculo.

Entende-se que a interacção de optimização entre as duas fases enunciadas, e os conjuntos de populações colocadas em presença no processo de calibração pelo algoritmo genético são, à partida, entendidas como incógnitas de cada uma das distintas fases do algoritmo em desenvolvimento, sendo tratadas sob a formulação de algoritmo genético inter-cruzado descrito, em que se assimilam a prática e a formulação de AG a uma população multi-espécie que possui características diferenciadas, mas que se inter-influencia, nos termos em que se efectuou inclusivamente exemplificação prática.

Esta abordagem realizar-se-á tendo-se em vista se permitir a mais eficaz intercepção, o mais possível unívoca, das soluções (de rugosidades e de consumos), maximizando-se a contribuição extensa de todos os dados que se possam obter. Mesmo se recolhidos, organizados e processados, ao longo de um tempo e número esparso e descontínuo de calibração. No limite do domínio amostrado da totalidade das variáveis, a calibração tenderá para características de determinação inversa do sistema de equações do modelador, permitindo a mais extensa calibração e organização de dados de amostragem possível de realizar sobre o sistema, exista método de intercepção das dimensões do sistema, que deste modo sejam disponibilizados.

Da maneira explicada, torna-se necessário disponibilizar um sistema que mantenha válidos os elementos amostrados e monitorizados de forma registada dos funcionamentos das redes em análise, ao longo de períodos que possam ser considerados extensos de simulação. Deste modo, incluiu-se no presente desenvolvimento se implementar, em quase continuidade (porque a continuidade não pode existir na amostragem, mesmo em simulação pura) e apensos, sistemas de controlo, monitorização, amostragem, e arquivo automatizados e organizados de forma a servir de suporte para a obtenção de dados do presente trabalho de dissertação.

A perspectiva desenvolvida, ao se constituir como integrada e integradora, a mediar dados de funcionamento e resultados de calibração, permitirá, simultanea-

mente, uma minimização das exigências de distribuição geográficas/temporais dos sistemas de amostragem de dados da rede, bem como de verificação continuada da qualidade. Isto é, a consistência e a esparsidade dos dados de cada determinado momento que se encontrem em observação pelo sistema poderá ser verificada por parâmetros calculados permanentemente pelo sistema.

A abordagem realizada foi restritiva, isto é, apenas dizendo respeito ao interior de uma abordagem de modelação matemática e informática pura. Esta perspectiva desenvolveu-se propositadamente neste plano, por possuir o objectivo prévio de desenvolvimento e demonstração prática do conjunto em tese e respectivas possibilidades de operacionalidade concebida, para o fim da presente dissertação. Nomeadamente, porque o objectivo primordial que se pretendeu ter em vista, e que se obteve, foi a enunciação de elementos práticos que experimentassem, comprovassem, corrigissem e desenvolvessem, a abordagem em investigação, realizada ao longo do presente trabalho.

A calibração extensa e automatizada de parâmetros relativos a redes reais de distribuição de água, isto é, o fim último que se pretendeu realizado através da realização da presente Dissertação, oferece-se no presente momento como uma fasquia demasiado importante. Todavia demasiado complexa também, para podermos prescindir do presente estágio que se desenvolve no presente trabalho. Se de outro modo, pensa-se poder-se legitimar uma completa desvalorização destes trabalhos, como realizados.

No presente momento, aborda-se o grau de exequibilidade prática da perspectiva desenvolvida sobre redes hipotéticas de distribuição, mas não sobre protótipos. Em sequência, fica entreaberta a porta da investigação para, não só a particularização de componentes adicionais de análise, como listado, como para a aplicação do presente modelo, estendido pela investigação que se entenda e consiga de realizar, a redes reais de distribuição de água.

No modelo utilizado, do modo descrito, será utilizado um modelo matemático para tracejar e simular virtualmente o funcionamento de um protótipo de rede de distribuição. Obter-se-á, a partir daqui, os dados que serão submetidos às análises e cálculos desenvolvidas para a obtenção da calibração pelo AG. O mecanismo de optimização será tendente a alcançar um ajuste dos valores presentes no sistema que, no caso presente, serão à partida totalmente conhecidos do modelo matemático “*tracejador*”. Mas apenas utilizada a parte que se queira englobar como dados, para o fim da realização de amostragens e monitorizações do sistema de busca.

Esta posição implicou a necessidade de desenvolvimento do presente trabalho de forma simplificada, de forma precursora a uma abordagem mais geral que já se indicou sobre a teoria aplicável e sobre sistemas reais. Pensam-se estes outros sistemas, melhor abordáveis após obtenção de conclusões e observações mais seguras, no âmbito sequente da presente investigação.

Os corolários que se conseguiram extrair e que se observam na presente dissertação, nomeadamente no que diga respeito a definições relativas à implementação de infra-estruturas de amostragem de dados e controle físico de sistema, determinação da matriz de sensibilidade do sistema de distribuição, e outras matérias correlatas e relativas, no geral, à análise de infra-estruturas de distribuição de água, poderão possuir algumas consequências práticas sensíveis em torno de matérias que dizem respeito, nomeadamente, às importantes e complexas matérias de diagnóstico, prognóstico e actuação sobre as redes. E estas possibilidades são antecedências de domínio obrigatório, ao caso da aplicação de sistemas de inteligência artificial automatizada à operação mais geral de redes de distribuição de água, convenientemente monitorizadas.

Também se perspectiva que pela presente abordagem (quer seja concretizada em termos de tracejamento virtual, quer de tracejamento sobre redes reais de distribuição de água), seremos sobretudo induzidos à disponibilização de sistemas de obtenção de dados com formas menos estáticas, antes dotados de formas mais dinâmicas e flexíveis de actuação. A abordagem que se realiza oferece-se assim como sendo de um novo tipo, que permita a integração mais flexível de dados, baseada, por exemplo, na utilização de equipamentos portáteis. E não, necessariamente, em bases infra-estruturais pesadas e fixas, que têm sido a forma mais comum de perspectivar a generalidade das análises académicas e práticas publicadas e conhecidas do presente âmbito de problemas.

Esta questão pode, só por si, independentemente da melhoria de qualidade que se possa demonstrar como decorrente do desenvolvimento do presente sistema de abordagem do problema, promover um incremento significativo sobre a economia e a flexibilidade, quer da concepção, quer da exploração dos sistemas de amostragem, monitorização e diagnóstico. Assim implementáveis a partir de bases diferentes, perspectivadas e analisadas a partir de conceitos diferentes de obtenção localizada de elementos, desenvolvidos como consequência da aplicação da presente dissertação realizada.

Assim, da abordagem mais fixa de monitorização, que actualmente encontramos profusamente em muitos trabalhos incluídos na bibliografia consultada, pretender-se-á que esta possa ser substituída por uma outra, o mais dinâmica e flexível possível de implementar. Que possibilite maior flexibilidade, melhor organização e mais elevada fiabilidade, na obtenção e processamento de elementos infra-estruturais, hidráulicos e de qualidade, na abordagem de calibração face ao funcionamento de redes genéricas de distribuição de água.

Esta perspectiva de actuação que se enuncia, assenta essencialmente no facto do algoritmo genético se poder imaginar como um caixa negra que *resolverá* todo o tipo de sistemas de equações, não necessitando, de forma directa, de compreender o mecanismo físico subjacente à resolução particular que tenhamos em abordagem.

2.2.2 Formas de organização da amostragem

As amostras realizadas sobre uma rede de distribuição de água, quando colocadas em perspectiva de calibração de redes, constituem-se como elementos que pretendem alimentar sistemas inversos de obtenção de dados de funcionamento dos sistemas. Deste modo, e por carência de elementos, pode-se colocar o sistema de calibração (qualquer que ele seja; implícito, explícito, ou por otimização) em circunstância óbvia de singularidade e de indeterminação, apenas superável pela injeção de dados suplementares, não linearmente dependentes daqueles que sejam já conhecidos.

Ao invés, através das hipóteses formuladas, a carência ou esparsidade de dados expressar-se-á não por uma indeterminação de determinante da matriz, com um significado geométrico e algébrico compreensível, mas incontornável e inoperativo em termos de obtenção de resultados, mas por uma dispersão da população em causa sobre o espaço amostral, por intermédio de processos que observam dispersões de resultados de calibração em redor de valores que anteriormente já se encontrariam estabelecidos como referência. Mas que, com o decorrer do tempo se observam de formas incrementalmente *espalhadas*, à medida que a falta de observações de amostra se faça sentir sobre as respectivas localizações. Isto é, após um determinado tempo de re-cálculo da solução e do fim sucessivo da validade temporal de dados que ocorram, a observação do incremento da dispersão de um determinado elemento que se encontrasse eventualmente já estabelecido, significará, para o nosso sistema, a existência de uma carência de dados mais recentes que alimente o sistema, sobre um local especificado de amostragem. E não, meramente, de uma indefinição irresolúvel e sem significado sobre a geometria e funcionamento da rede de distribuição.

Esta questão, organiza os procedimentos em termos de necessidades relativas da recolha de dados, ordenando-se deste modo a prioridade de recolha de dados para amostragem. A todo o momento do processo de calibração, definir-se-á a lista, quer dos tipos, quer das localizações, dos dados mais necessários de se obter para alimentar o sistema.

Como apresentado em parte própria do presente trabalho, existe uma discrepância significativa entre o número de incógnitas presentes numa abordagem de dimensionamento e na abordagem de calibração. O cardinal do conjunto de incógnitas é mais elevado quando colocado o sistema em circunstância de calibração, face à alternativa mais acessível do dimensionamento.

Todavia se tivermos em conta uma realidade de explanação das hipóteses que servem de base à calibração como abordado no presente trabalho, e anteriormente indicadas, o mecanismo de calibração que se busca para um sistema de distribuição de água, poderá ser teoricamente abordado como a intercepção de uma multiplicidade de espaços-solução, onde cada um dos múltiplos e diversificados valores de amostragem do protótipo seja obtido em tempos de análise distintos, mas eventualmente sucessivos.

Esta perspectivação da realidade pode ser entendida como a geração, para um mesmo conjunto de incógnitas (rugosidades ou consumos nos nós), de equações adicionais, em que o tempo e a alteração de dados e resultados se constituirá em dimensões suplementares, conseguindo-se resolver de forma extensa o sistema que se encontrará presente na abordagem particular de calibração, nos termos que se pretenderá enunciar. Ocorrerá, deste modo, uma intercepção suplementar de condicionantes que permitirá, sob as condições particulares de hipóteses que se colocaram em tese, eventualmente e sob condições controladas, obter a resolução/determinação do sistema objecto de equação directa da modelação. Mesmo para o maior número de incógnitas colocadas em presença num sistema em calibração e recorrendo o processo a um mínimo de dados de amostragem.

Capítulo 3

Demonstração

3.1 METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO

Como âmbito do presente trabalho, já se referiu não se entender como interessante abordar as condicionantes e formas sobre as quais ocorra a melhor particularização da abordagem proposta. Apenas, tão somente, levar por diante e observar a funcionalidade de um esquema do tipo do que é descrito e proposto, para a abordagem de calibração de uma rede de distribuição de água.

Porém, o princípio que se pretende levar por diante para abordagem da calibração com a simulação de um período extenso de funcionamento do protótipo, recorre a um algoritmo genético. Circunstância que, pela diversidade de formulações passíveis de o desenvolver, exigem uma descrição mais detalhada da forma concreta que foi utilizada.

3.1.1 Codificação dos dados dos elementos populacionais

Tentou-se inicialmente uma codificação binária de valores inteiros, sujeitos a uma função de transformação para valores decimais que resulte num posicionamento de vírgula com duas casas significativas. Em termos decimais, o espaço possível de variação das rugosidades oscilaria entre 0,01 e 2,56 *mm* (256 posições distintas); no caso dos consumos nos nós, os valores em análise oscilariam entre 0,0 e 102,3 *L/s* (1.024 posições distintas).

Na estrutura de dados binária, o tamanho do gene relativo a cada uma das rugosidades de cada tubagem necessitava de possuir uma cadeia de 8 caracteres (de exactamente 256 posições). Por outro lado, o gene relativo a consumos em cada nó, necessitava de possuir uma cadeia de 10 caracteres (de exactamente 1.024 posições).

De forma decorrente, esta codificação de rugosidades e de consumos, uma vez que se está perante uma rede de distribuição a estudar que possui no limite 21 tubos e 13 nós, conclui-se que o cromossoma (isto é o conjunto total de genes), relativo a rugosidades possuirá 168 posições de genes, relativas a 21 alelos (isto é o conjunto

Tabela 3.1: Cromossoma de rugosidades

Cromossoma R (#)	Valor inteiro i (#)	Rugosidade k (mm)
00000000	0	0,01
00000001	1	0,02
00000010	2	0,03
00000011	3	0,04
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
* * * * *	i	$k = \frac{i}{100} + 0,01$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
11111100	252	2,53
11111101	253	2,54
11111110	254	2,55
11111111	255	2,56

Tabela 3.2: Cromossoma de consumos nos nós

Cromossoma Q (#)	Valor inteiro i (#)	Consumo Q (L/s)
0000000000	0	0,00
0000000001	1	0,01
0000000010	2	0,02
0000000011	3	0,04
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
* * * * *	i	$Q = \frac{i}{10}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
1111111100	1020	102,0
1111111101	1021	102,1
1111111110	1022	102,2
1111111111	1023	102,3

de genes relativos a esta característica), e que o cromossoma relativo a consumos possuirá 130 posições de genes, relativas a 13 alelos presentes.

O relacionamento entre a codificação presente no cromossoma e o valor real correspondente expressar-se-á das formas indicadas nas Tabelas (3.1) e (3.2), respectivamente para o cromossoma de rugosidades e de consumos nos nós.

Os dados seriam armazenados segundo os dois aspectos indicados, um referente a rugosidades nas tubagens e outro a consumos nos nós, abrangendo-se na abordagem de cada caso o cardinal de população que se entendesse necessário para o desenrolar do processo.

Esta circunstância, integrada numa linguagem de programação que obrigará a que a representação de cada um dos bites da codificação binária se efectue por uma representação real decimal, evidencia dificuldades extremas de ocupação de memória e que se tornam inoportáveis em termos de disponibilização de memória informática e tempo de processamento disponíveis para a estrutura de programa

desenvolvido.

Deste modo, a codificação dos elementos da rede teve que ser re-abordada, em termos de dados de cada elemento populacional, através de uma codificação representada por números inteiros, *decimalizados* pela intervenção de um operador quociente.

Porém, algumas das dificuldades que foram sentidas disseram também directamente respeito a falhas das características apresentadas pela “*toolbox*” de *Matlab* utilizada para suporte do algoritmo genético, e que foi providenciada por Chipperfield (1994) [44]. Neste aspecto referido, tornou-se necessário corrigir dois pequenos aspectos da implementação da “*toolbox*” utilizada no AG, um deles, relativo à função “*CRTRP*”, e um dos seus detalhes de entrada de dados, o outro dos aspectos, mais pesado, resultou da observação de que a função “*MUTBGA*” não produzia valores consistentes com os objectivos que enunciava e se pretendiam, sendo necessário substituir esta função de “*toolbox*” por uma nova sub-rotina, expressamente desenvolvida para o efeito de produzir uma mutação sobre uma população codificada sob forma de números inteiros *decimalizados*.

3.1.2 Partes constitutivas do algoritmo

Módulo 1 do AG - Simulação do funcionamento real da rede.

A base de partida deste módulo será constituída pela parte do programa que gerará valores para os consumos nos nós e rugosidades. Estes valores serão, no presente momento, apenas relativos a uma lista ordenada de constantes, buscando o processo em desenvolvimento a determinação inversa dos elementos desta lista.

A utilização de um processo estocástico para a geração dos consumos nos nós do modelo, que já foi reputada anteriormente de essencial e de abordagem desejável, em fase posterior de uma investigação, entende-se como interessante de realizar. Todavia, as dificuldades de implementação desta perspectiva no imediato, dada a limitação de âmbito e de tempo do presente trabalho, a uma dissertação de Mestrado a concluir agora, face às exigências envolvidas na investigação sugerida, julga-se suficiente para justificar a opção tomada, bem como outras em semelhança, no âmbito do presente trabalho.

Esta parte do programa também pegará nos dados, introduzidos da forma explicada nos parágrafos anteriores, e simulará o funcionamento da rede de distribuição de água que se pretende calibrar. O módulo localará às variáveis devidas, a totalidade dos valores constitutivos do estado da rede de distribuição de água, gerando-se, em consequência desta actuação, todos os dados de funcionamento da rede.

Esta parte do programa abordará nomeadamente os dados que concernem às rugosidades das tubagens e aos consumos instantâneos de cada nó. Os restantes dados em equação, isto é, diâmetros e comprimento das tubagens, topologia de inter

conexão dos nós pelas tubagens, etc., serão considerados integrados como domínio de conhecimento directamente constatáveis e à partida e considerados ausentes de erro de cadastro do sistema de distribuição modulado.

Módulo 2 do AG - Determinação de critérios para amostragem do funcionamento da rede.

A alocação dos pontos de amostragem decorrerá da observação da dispersão das populações correspondentes a cada dado e a cada localização de variável (pressão, nos nós, e velocidades, nos tubos). A avaliação realizada implica a sinalização dos pontos a amostrar em cada momento, conjunto de sinais estes que permitirão a interface de informação de dados entre o mecanismo calibrador do algoritmo genético e a rede *protótipo*. Este aspecto do programa implica a memorização ordenada dos dados de simulação a disponibilizar como histórico armazenado, perante a abordagem de busca e comparação de parâmetros.

Os dois módulos até agora descritos pretende-se que possuam condições para gerar um *output* de avaliação consistente entre dados de funcionamento da rede em análise e a calibração respectiva de parâmetros de funcionamento da rede. Esta avaliação pretende-se que possua uma perspectiva global e local, quer do ponto de vista espacial quer temporal, numa amostragem e análise integrada e tendente ao desiderato pretendido de inversão do modelo, ou, no caso não tão bom mas também interessante, de calibração do sistema de distribuição de água.

A sugestão proposta para formulação dos consumos de água na rede a simular, para além de todas as questões relativas ao combate algébrico à singularidade do sistema em inversão, poder-se-á suportar sobre alguns dos trabalhos que incidem sobre a matéria de análise dos consumos de água de redes domésticas. Estes trabalhos sugerem a presença de uma distribuição do tipo de *Poisson*, aspecto já esclarecido anteriormente na dissertação e compulsável na bibliografia consultada.

Módulo 3 do AG - Obtenção inversa dos parâmetros de funcionamento da rede.

A obtenção inversa dos parâmetros de funcionamento da rede será realizada recorrendo-se ao seguinte conjunto de características e configurações do AG a utilizar:

- a) Utilização de um filtro para armazenamento permanente das melhores soluções;
- b) Método de selecção por torneio, segundo critério de dominância;
- c) Operadores convencionais de mutação e recombinação, uniforme;
- d) Operador de mutação, aplicado sobre formas repetidas;

- e) População inicial gerada de forma aleatória;
- f) Probabilidade de recombinação de 85%;
- g) Probabilidade de mutação variável segundo o inverso da dispersão observada, num máximo de 5%;
- h) População de rugosidades, fixada em 100 indivíduos;
- i) Populações de consumo nos nós de cada momento em análise, fixada em 10% da população total de rugosidades, num mínimo de 13 unidades;
- j) Tamanho do filtro de dominância fixado em 10% de cada população;
- k) Gerações das rugosidades produzidas após cada análise temporal histórica completa, sob um processo de processamento que poderá ser, em alternativa porém não utilizada, eventualmente paralelizável e estendido a cada análise temporal;
- l) Gerações de consumos nos nós de cada momento histórico de análise, produzidas após cada análise temporal.

Este conjunto fundamental de características do AG foi estabelecido inicialmente de acordo com valores razoáveis, que se entenderam de forma apriorística convenientes para a aplicação que se necessitava de realizar e aplicáveis a algoritmos genéticos na sua formulação canónica.

Foram, no entanto, objecto de uma observação de resultados de variadíssimas corridas do programa que assim foi sendo desenvolvido, sendo as disposições finais apresentadas decorrentes de muitas correcções de abordagem fundamentadas em observações diversas daquelas que foram finalmente apresentadas. As estruturas adoptadas mostraram-se mais consentâneas, que muitas outras testadas, no sentido de maior alcance dos objectivos colocados em equação, e que resultaram na abordagem que se apresenta na Dissertação.

Uma maior evolução, sobre estes desideratos, e eventualmente a obtenção de resultados mais satisfatórios que os presentemente realizados, pensa-se como razoável de poder/dever de acontecer, em termos da formulação de estrutura também da programação genética utilizada. Significa isto, numa perspectiva de abordagem de um algoritmo evolucionário mais global, poder-se/dever-se conter/desenvolver mecanismos de optimização do próprio algoritmo que se utilize que, ao envolver a avaliação de formas e de valores estruturais da abordagem, a transforma de forma mais geral num algoritmo evolucionário. Isto é, que possa buscar por si, automaticamente, a optimização de parâmetros e de características de base do algoritmo genético, que se possam oferecer como mais próprios para utilização.

3.1.3 Sensibilidade presente

O sistema de calibração que se pretende desenvolver possui características de sensibilidade diferenciada, relativamente aos valores colocados em análise. Nomeadamente uma baixa sensibilidade relativa da rugosidade das tubagens, nomeadamente daquelas que possuam menores velocidades de escoamento. Este problema é profusamente referenciado na bibliografia consultada sobre esta matéria, constatando-se no funcionamento do presente algoritmo também esta circunstância, que se traduz em alguma incapacidade para a obtenção de resultados. Nomeadamente de diminuição da distância do modelo ao protótipo, relativamente a esta variável.

3.1.4 Influência da geração inicial de dados

Como o sistema oferece um balanceamento permanente de influência entre o presente e observações passadas, influências assim retroactivas e cruzadas entre dados em compilação progressiva, utilizando quer elementos em que se plasma influência de longo prazo (como é caso na obtenção de rugosidades), quer de prazo instantâneo relativo ao momento em análise (como é caso para obtenção de consumos em nós), a evolução da resolução do sistema oferecer-se-á iterativa, variando progressivamente à medida que se efective uma aferição mutua entre rugosidades e caudais. Estes factores possuirão, como facilmente se imagina, antecedenças de certo modo significativas, da forma contida para geração inicial de dados.

De qualquer modo e por ausência de critério que permita outra representação, a geração inicial das populações obedecerá a critérios de estabelecimento aleatórios, quer para as rugosidades, quer para o consumo dos nós, quer para a definição da amostragem a realizar. Esta perspectiva obrigará, porém, à consideração de um período suficientemente alargado de estabilização do cálculo, que permita uma evolução consistente das definições de amostragem, quer de populações, nomeadamente dos indivíduos “*mais adequados*” que, de forma interligada, forem emergindo.

3.1.5 Sistemas a integrar

Os sistemas que se pretende fazer convergir para solução, são os da modelação hidráulica (em escoamento estabelecido e transitório), bem como de qualidade, abordados numa perspectiva de integração mútua e extensão temporal. Todos estes modelos preconizados convergirão no sentido da obtenção de uma matriz de aquisição de dados em sistema integrado de amostragem, pretendendo-se que possa resultar num processo de inversão dos dados de amostra, para dados de constituição da infra-estrutura.

Todavia, dadas as dificuldades de desenvolvimento dos modelos de qualidade e transitórios, aplicáveis aos sistemas e anteriormente explanadas, estas áreas de conhecimento não interferirão no modelo explicitado.

Esta situação não impede, antes pelo contrário, preconizar-se a integração destes sistemas no modelo, como áreas promissoras de futura abordagem da calibração de redes de distribuição de água. Organizada segundo as hipóteses presentemente colocadas, questão já referida para cada um dos conjuntos de variáveis referidas.

3.1.6 Redes hidráulicas para análise do sistema

As redes hidráulicas que se analisarão serão constituídas por uma sucessão de redes, crescentes em número de malhas constitutivas. O caso mais complexo de rede constituir-se-á pela proposta de rede observada em Ormsbee (1986) [171], todavia com formulação de consumo nos nós e rugosidades diferentes, tendo em vista a utilização da formulação de perda de carga de Darcy-Weisbach. A topologia desta rede possui forma suficientemente extensa e complexa, podendo facilitar ao mesmo tempo a comparação entre diversas metodologias de optimização e calibração de redes de distribuição de água propostas por diversos autores (*in* Savic, 2002 [206]). Daí, o interesse da sua inclusão neste trabalho.

3.1.7 Algoritmo

A obtenção de dados de funcionamento será realizada exclusivamente pelo algoritmo subjacente à biblioteca externa de funções do programa informático *EPANET* (compilada sobre linguagem *C*), e desenvolvido pela *Environmental Protection Agency*, do Departamento Norte Americano de Ambiente. Esta biblioteca e este programa, para além de se encontrarem suficientemente testados, garantindo fiabilidade e conformidade de resultados com a teoria e práticas aplicáveis, apresenta-se com comandos fáceis¹, que se integram uma linguagem informática não compilada, tal como representado pelo *MATLAB*, numa formulação que se ponderou possuir maior adequação, em termos de *programabilidade* e disponibilidade de ferramentas já desenvolvidas, que alternativas mais directas disponíveis, nomeadamente alcançáveis através de uma programação compilada em *Visual Basic*, *C/C++*, *PASCAL*, *FORTRAN* ou outra.

No entanto, no sentido de permitir esta abordagem, teve o autor de desenvolver todo o conjunto de rotinas de interligação entre a biblioteca externa compilada do *EPANET* e a linguagem utilizada. Este outro trabalho, apesar de não ser o “*core directo*” da demonstração da tese, integrou parte significativa do esforço prático da sua concretização.

No geral, e como justificador do seu uso, o *EPANET* oferece um código fonte aberto em linguagem *C* standard. Esta situação permite poder realizar-se todo o tipo de modificações sobre o código fonte, tendo em vista recompilações transfor-

¹Fáceis, mas justo de referir, apenas depois de meses de desenvolvimento, pelo autor, da “*toolbox*” de interface entre a biblioteca externa do *EPANET* e o interpretador *MATLAB*.

madras da biblioteca externa e das funções disponibilizadas, e mesmo correcções que sejam (muito improvavelmente, porém) apontáveis.

Como biblioteca externa, o *EPANET* torna-se utilizável de forma sistematizada a partir do programa que sirva de base ao algoritmo, simulando de forma directa formas diferenciadas ou períodos extensos de funcionamento do protótipo e do modelo, que se pretendam suportar na simulação.

O programa de manuseamento é segregado nos módulos que se descrevem da forma seguinte:

QUESTÕES GERAIS

Determinação de consumos

Os consumos serão considerados concentrados nos nós. Esta simplificação integra o normal de abordagem desta matéria, considerando-se suficientemente justificada esta posição para poder ser adoptada sem mais considerações no algoritmo.

A definição da função de consumo em cada nó poderá ser consequente de um valor que aferirá a percentagem de consumidores afectos, bem como a uma distribuição de consumo que, para além de possuir uma variação temporal (horária, diária, semanal e mensal), será decorrente da aplicação de uma distribuição de probabilidade dotada de algum mimetismo com a realidade, através de um modo de distribuição estocástico cuja explanação desejada já se desenvolveu anteriormente.

Porém, nesta primeira fase de desenvolvimento, considerar-se-á os consumos como constantes nos nós, abandonando-se, para já, outras eventuais abordagens mais complexas. Porém esta posição não deverá esmorecer investigações futuras que integrem este tipo de perspetivação sobre as definições dos consumos como elemento adicional que limite a evolução dos parâmetros e a singularidade dos sistemas de equações, aumentando assim as possibilidades de determinação inversa que se busca.

Objectivo do algoritmo

O algoritmo desenvolvido visa, de modo mais significativo, a verificação da exequibilidade e a demonstração da tese que é presentemente formulada. Tem-se em vista a possibilidade de aproximar, pela via formulada, as características mais fundamentais de parâmetros geométricos e hidráulicos de redes de distribuição de água em funcionamento. Isto é, considera-se constante no tempo a rugosidade de cada tubagem da rede de distribuição em análise, concomitantemente à consideração de uma evolução dos consumos de água nos nós, segundo mecanismos que possam se considerar como contínuos e diferenciáveis relativamente à variável temporal.

Para este objectivo recorreu-se a uma formulação genética em que a verificação da

função objectivo do algoritmo é desenvolvida de forma cruzada entre uma população global de rugosidades e um conjunto de populações de consumo nos nós, relativas cada uma destas últimas a um momento histórico relativo aos diferentes momentos integrados da análise.

Todavia, a formulação genética apenas se deverá considerar como um dos métodos aplicáveis para a aproximação proposta dos modelos às redes reais de distribuição de água no modelo que se desenvolve. Podem novas abordagens, nomeadamente relativas a outros métodos de optimização ser testados sobre o presente figurino. Salvaguardadas que sejam as necessárias adaptações que cada caso de mecanismo de optimização contenha e exija.

A primeira das hipóteses utilizada, configura um axioma que apenas pretende integrar uma realidade que será até subjectivamente compreendida e considerada de forma assertiva como válida. De facto, a constância estrutural das características estruturais das redes, nomeadamente de rugosidade (mas também de diâmetros, de comprimentos das condutas, de topologia dos nó, características físico-químicas da água, etc.), constitui-se como algo que, de muitos modos, se constituirá como aceitável, até mesmo com naturalidade e sem recurso a demonstrações muito complicadas. Sobre esta matéria pensa-se inclusivamente que, quando muito, poder-se-ia colocar em causa a validade dos relacionamentos que se encontram desenvolvidos sobre a matéria, nomeadamente entre rugosidade e perdas de cargas em condutas, questão que agora e todavia, não se considera possuir interesse de abordagem, para o fim em vista de desenvolvimento da dissertação.

Estas questões apresentadas implicam também o pressuposto da inexistência de histerese no funcionamento dinâmico em variação, das estruturas de distribuição, consequência de uma esperada “*in-deformabilidade*” e “*in-plasticidade*” sobre os resultados hidráulicos relativos aos elementos constitutivos das redes de distribuição de água. Como corolário deste conjunto de justificações, tendentes a validar a aplicação desta hipótese da tese, obter-se-á uma esperada robustez, decorrente de uma qualidade das características de implementação das infra-estruturas de abastecimento de água. Questão sempre desejável e que, no possível, se pretende tornar o mais presente nos sistemas executados.

A segunda hipótese que se coloca, diz respeito a se querer (e se esperar), que o consumo nos nós deva se ligar a mecanismos físicos e/ou sócio-económicos e culturais de distribuição temporal dos consumos. Esta circunstância indica poder/dever ser esta variável sistematizadamente prevista como função das populações servidas pela rede, respectiva distribuição geográfica e hábitos de consumo, também decorrentes de factores do âmbito meteorológico, como a temperatura e a humidade ambiental. A representação final que se preconiza, em tese, também pelas necessidades envolvidas para alimentação do modelo matemático de calibração que se desenvolve, terá de conter a obtenção de resultados que possuam cariz estocástico, avaliável em termos

de parâmetros de distribuição de probabilidade da quantidade e das distribuições geográficas e temporais, dos consumos.

A abordagem presentemente desenvolvida para este tema dos consumos, foi decorrente do facto da abordagem que tradicionalmente é efectuada por regulamento, nomeadamente para efeitos do cálculo das redes de distribuição de água, não possuir suficiência para a conveniente alimentação do modelo.

Da inferência desenvolvida sobre o estado de rugosidade das tubagens e perspectiva de evolução dinâmica em alargados períodos de análise (médio e longo prazo), poderá ser esperado um relacionamento com a respectiva tuberculização. Este relacionamento poderá condicionar e justificar decisões de intervenção reabilitadora sobre as infra-estruturas.

Alguns dos factores de consumo que existam numa rede de distribuição de água e que condicionem a solicitação, poderão se identificar a partir de um desenvolvimento do sistema complementar de análise, como preconizado. A possibilidade de busca automatizada de tipos múltiplos de variações da variável de consumo nos nós tornou-se, deste modo, também um dos desideratos do presente trabalho. Esta possibilidade implica o domínio dos pressupostos e das circunstâncias da distribuição, que compreendam resultados de média e variação de consumo, ao longo dos diferentes pontos geográficos da rede e dos diferentes momentos e tempos em que se expressa a exploração de uma rede de distribuição de água.

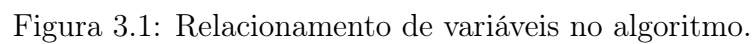
Pensa-se exequível, através da abordagem que se desenvolve, encontrar características do funcionamento de redes de distribuição de água, numa perspectiva consequente de diagnóstico, mais completo e mais fundamentado, que, por conter objectivação suficiente, permita algum desenvolvimento na aplicação de princípios de inteligência artificial à exploração de sistemas de distribuição de água.

Descrição do algoritmo.

O algoritmo genético foi desenhado apenas como ferramenta de demonstração da presente tese. Não se desenvolveu nenhuma optimização especial dos seus parâmetros e características que se envolvem no seu corpo, nem questões especiais de apresentação ou de facilidade, por exemplo, para a entrada de dados. Estes aspectos referidos, constituindo-se todavia a abordagem como promissora num investimento de investigação futuro, não se revelaram no presente âmbito como penalizantes do presente estágio de desenvolvimento.

A figura (3.1) pretende ilustrar a abordagem de algoritmo como realizado, tentando clarificar visualmente melhor o esquema que se fez seguir pelo programa de cálculo.

Nesta figura:



1_Ct, 2_Ct, 3_Ct, ... , P_Ct, ... , N_{ind}_C_Ct – População de consumos de água nos nós relativa ao tempo $t = N_{ssd} \times N_{dss}$;

Em caixilho, os “*melhores*” elementos de cada população, avaliados de forma cruzada.

A verificação de cada indivíduo de “*Chrom_C*” é efectuada face ao avaliado “*melhor*”, do conjunto de indivíduos de “*Chrom_R*”. O reverso aplica-se, também, em sentido contrário. Isto é, a verificação de cada indivíduo de “*Chrom_R*” é efectuada face ao “*melhor*” dos consumos de cada conjunto de indivíduos de consumos nos nós.

A primeira forma que se seleccionou para concretizar a avaliação do algoritmo descrito, foi uma forma estática de estudo. Significa isto que se escolheria um calendário real de protótipo no qual se fizesse incidir o cálculo de estimação, bem como o intervalo de tempo a que diriam respeito os dados do estudo. Destas duas escolhas prévias, resultaria um número individualizado de diferentes estados da rede, nos quais se conheceriam dados de funcionamento, obtidos automatizadamente pelo sistema de amostragem. A obtenção de dados, isto é o modelo de amostragem, seria intermediado através de uma grelha de distribuição, espacial e temporal, de dispositivos de amostragem de pressões nos nós e de caudais nas tubagens, que por sua vez é determinada pelo desenrolar do algoritmo.

A primeira hipótese de grelha equacionada foi a de 100 indivíduos para cada uma das populações de rugosidades e de consumos nos nós, bem como de um ano completo (365 dias) de histórico de análise. Nesta primeira fase ainda se colocava a possibilidade de recurso a uma codificação binária dos indivíduos do algoritmo genético.

Porém, para a rede em estudo, teríamos de ocupar $8 \times 22 \times 100 + 10 \times 14 \times 100 \times 4 \times 24 \times 365$ posições de memória para concretização da abordagem. Para além do peso computacional que isso representaria, havia a acrescentar a necessidade de manuseamento do equivalente a uma matriz quadrada de cerca de 22.149×22.149 posições de memória. Esta era uma circunstância pouco exequível, mas sobretudo despropositada e possível de abordar melhor, por outras formas mais exíguas de tamanho de variáveis. Entretanto, progredia-se no desenvolvimento do algoritmo empregue e depuravam-se os pequenos “*bug's*” que a complexidade da abordagem do algoritmo tornava presente.

A principal dificuldade a ultrapassar foi, desde logo, o tempo de processamento necessário para a iniciação dos dados. Cerca de duas horas de funcionamento do programa para uma locação de 4 indivíduos na população de rugosidades e outros 4 nos consumos de nós relativos a 4 estados por hora, durante 365 dias, tornaram mais evidente que a abordagem teria de ser outra. Até porque, por este modo, a locação inicial dos dispositivos de amostragem só poderia ser abordada de forma aleatória, questão que impediria qualquer distribuição ponderada destes dispositivos, no algoritmo, pesando critérios objectivos. Era fundamental integrar um mecanismo que permitisse a movimentação destas estruturas como consequência de resultados de avaliação e de critérios que fossem de algum modo compreendidos de forma

sistemática sobre a análise dos dados disponibilizados.

Optou-se por se inicializar em sequência os dados, conferindo-se ao programa uma evolução temporal progressiva. O cálculo passa a desenrolar-se num ciclo que é inicializado de forma aleatória no momento actual, passando-se de imediato à avaliação histórica e progredindo-se os dados no final de cada ciclo de análise/geração de consumos nos nós e de rugosidades de cada estado, para a análise e tempo seguinte. Gera-se e mantém-se um histórico de dados processados que representam a intercepção dos melhores resultados permanentemente desenvolvidos no algoritmo.

Nesta fase de desenvolvimento fez-se oscilar o cardinal de indivíduos de cada conjunto de população, bem como o tempo de histórico para análise, no sentido de se poder obter uma melhor aferição destas diversas características mais fundamentais do algoritmo, tendo em vista o melhor desempenho global do programa.

O critério para a ordenação dos lugares a submeter a amostragem, foi concebido através da ordenação respectiva da variância dos caudais (para os medidores de caudal) e das pressões nos nós (para os medidores de pressão), que fossem observáveis no conjunto fenótipo, consequente das populações de consumos nos nós e de rugosidades que, em cada momento de análise e sobre cada local, sobrevivessem presentes.

Este critério, discutível até porque se considerou necessário incluir-se no algoritmo genético a intervenção adicional de um varrimento dos elementos iguais por re-mutação determinística, que incrementa esta variância, constitui-se, no entanto, como aquele que melhor resposta lógica se considerou poder oferecer para esta função. Caso o algoritmo progrida para uma singularidade decorrente da falta de dados (nomeadamente em qualidade e localização, porque a quantidade total de locais de amostragem será um dado do nosso problema de amostragem) o que se observa será a incapacidade do algoritmo em poder distinguir a solução pontual adequada e qualquer solução se oferecer como igual. Esta circunstância, resultando num “*espraiamento*” da população relativamente à variável de fenótipo em causa, localará a amostragem do momento presente consoante a ordem inversa da variância de observações respectivas.

Chegados ao fim da fase conceptiva do algoritmo fixaram-se as seguintes características listadas para o algoritmo:

Quantitativas:

- i) Dias de histórico de simulação (variável “*Ndss*”): 2;
- ii) Número de simulações diárias (variável “*Nssd*”): 24;
- iii) Populações de consumos nos nós de cada momento de análise: 100 elementos;
- iv) População de rugosidades: 100 elementos;

- v) Constante de mutação igual ao inverso do número de variáveis em presença em cada indivíduo;
- vi) Constante de recombinação, em todo o algoritmo, de 0,7;
- vii) Constante de substituição das gerações de 90% da população em análise, substituição esta realizada segundo critérios de adequação decrescente.

Qualitativas:

- i) Presença de um mecanismo, sobre cada análise, que difunde para si, integrando, o melhor indivíduo colocado anterior e posteriormente da análise estimada no ciclo anterior. Este mecanismo estabelece uma ligação permanente entre todos os momentos em análise, que previne a perda de tempo de processamento, corporizado no histórico de seleccionamento mais afastado, sempre que, pela passagem do tempo real do protótipo, sejam incorporados novos dados e novas populações aleatórias, no sistema;
- ii) Um varrimento de sobre-mutação sobre as populações que extirpa por re-mutação os elementos que se ofereçam como absolutamente semelhantes;
- iii) Aplicação geral às operações de mutação de uma probabilidade que possui um valor inicial constante (função inversa do número de variáveis de cada indivíduo), mas cujo valor decresce de forma inversa à função aparente de objectividade;
- iv) Iniciação da totalidade dos dados do cálculo, segundo uma definição aleatória;
- v) Presença de um mecanismo que, no final de uma análise, difunde o melhor consumo nos nós que tenha sido encontrado de forma relativa a todos os tempos em análise, à totalidade da população respectiva. Este mecanismo pretende reforçar o mecanismo de difusão que também é contido no item i) anterior.

A abordagem de exemplos de redes que foi efectuada, tendo em vista a obtenção de resultados que permitam conclusões para a tese, seguiu o esquema constante de atribuição de dados, segundo os conjuntos de vectores de estrutura geométrica e hidráulica seguinte:

Um máximo de 22 diâmetros de tubagens (em *mm*): [250 200 250 250 200 200 200 200 200 250 250 250 150 150 250 250 300 300 200 200 150].

Um máximo de 22 comprimentos (em *metros*): [450 250 170 250 170 150 160 140 140 300 300 200 200 300 175 250 150 299 1 80 300 200].

Um máximo de 22 rugosidades (em *mm*): [0,2 0,3 0,2 0,7 0,2 0,2 0,3 0,2 0,9 0,2 0,3 0,2 1,0 0,7 0,3 0,2 0,3 0,2 0,5 0,2 0,3 0,2].

Um máximo de 14 consumos nos nós (em *L/s*): [79,70 98,70 59,30 84,00 88,90 57,20 91,30 100,00 63,90 73,80 81,90 57,80 61,20 81,70].

Estas sequências de dados serão utilizadas para construir redes de complexidade crescente (ramificadas e malhadas), através de ramos e malhas sucessivas, em quantidade crescente.

O limite de complexidade da presente análise, que se pensa de algum modo mais representativo de redes reais, será constituída pelo apresentado em Ormsbee, L. E., Wood, D. J. (1986) [171], no exemplo de aplicação de rede que aí é oferecido.

3.1.8 Redes que se analisaram

Redes ramificadas

Nas figuras (3.2), (3.3), (3.4), (3.5), (3.6), (3.7), evidenciam-se as características geométricas das redes ramificadas que se utilizaram.

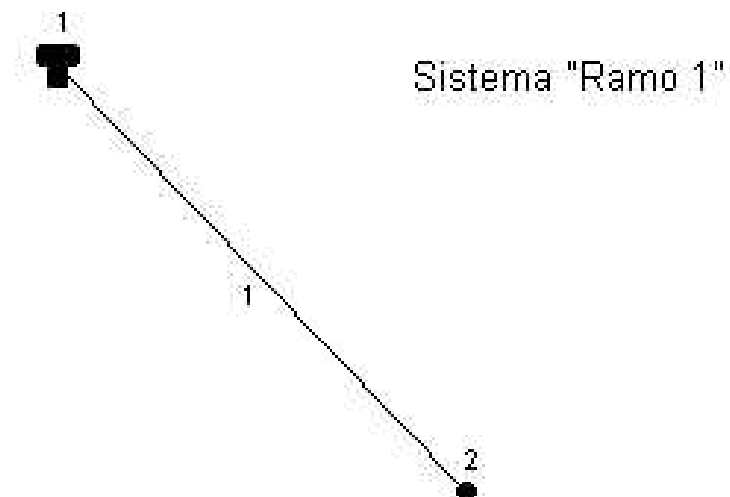


Figura 3.2: Sistema “*Ramo 1*”.

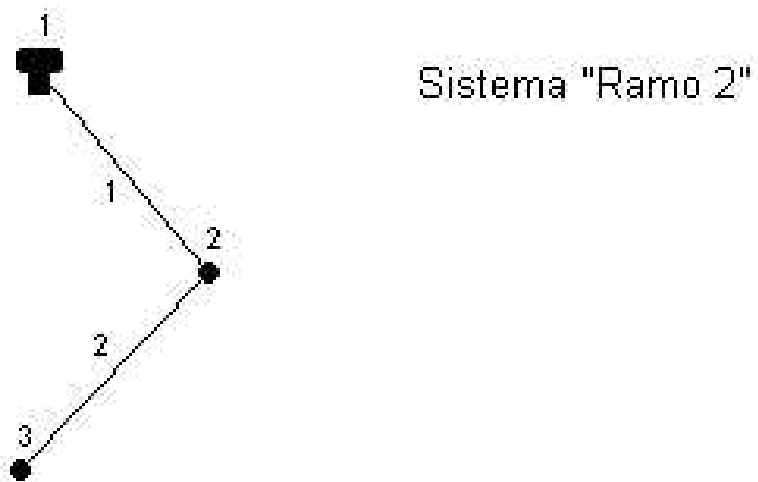


Figura 3.3: Sistema “*Ramo 2*”.

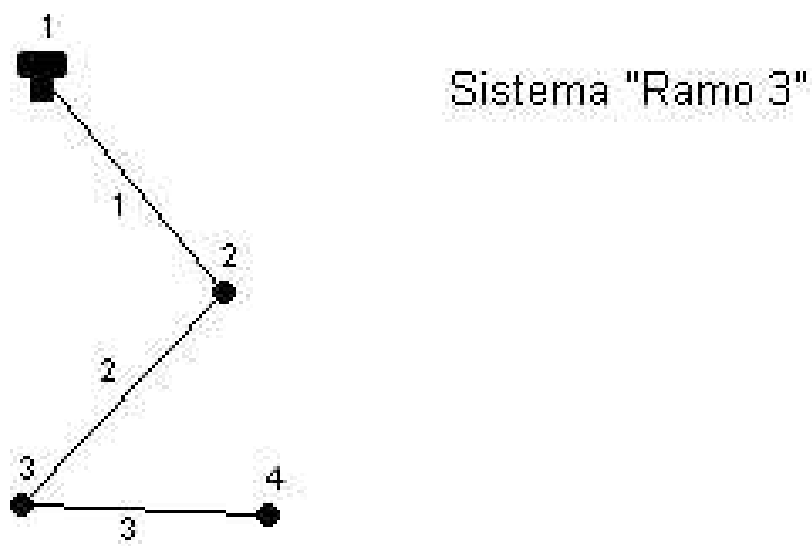


Figura 3.4: Sistema “*Ramo 3*”.

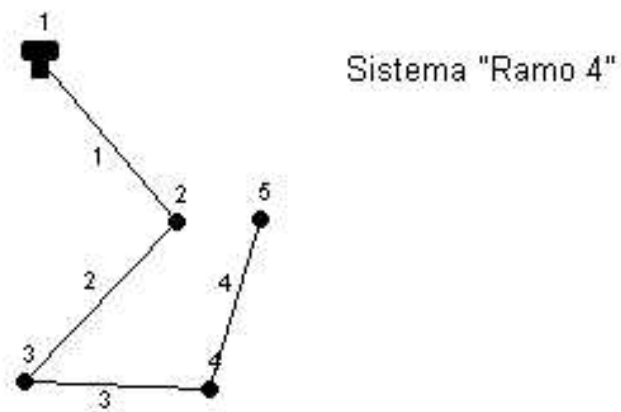


Figura 3.5: Sistema “*Ramo 4*”.

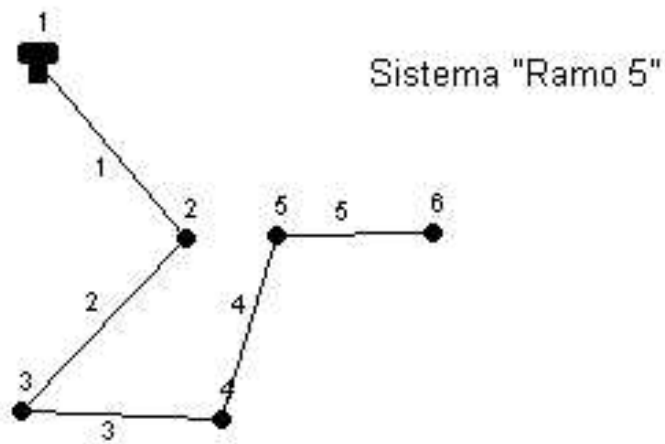


Figura 3.6: Sistema “*Ramo 5*”.

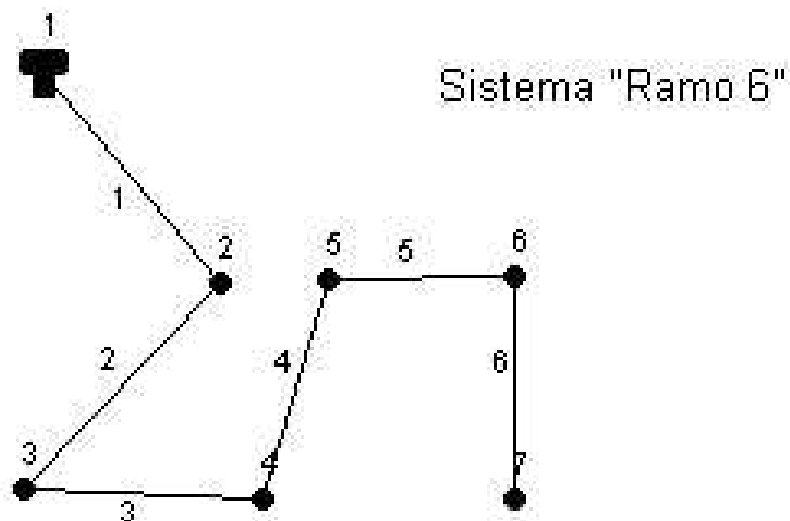


Figura 3.7: Sistema “*Ramo 6*”.

Redes emalhadas

Nas figuras (3.8), (3.9), (3.10), (3.11), (3.12), (3.13), evidenciam-se as características geométricas das redes emalhadas que se utilizaram.

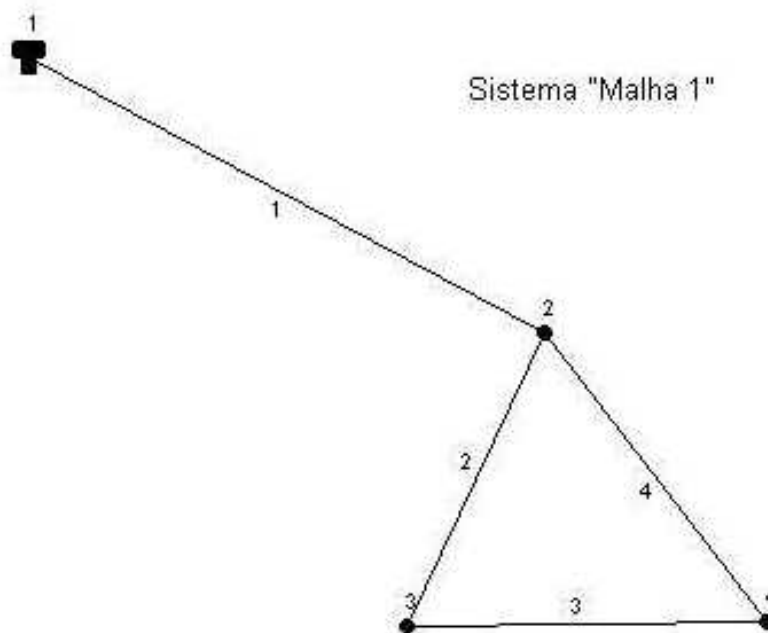


Figura 3.8: Sistema “*Malha 1*”.

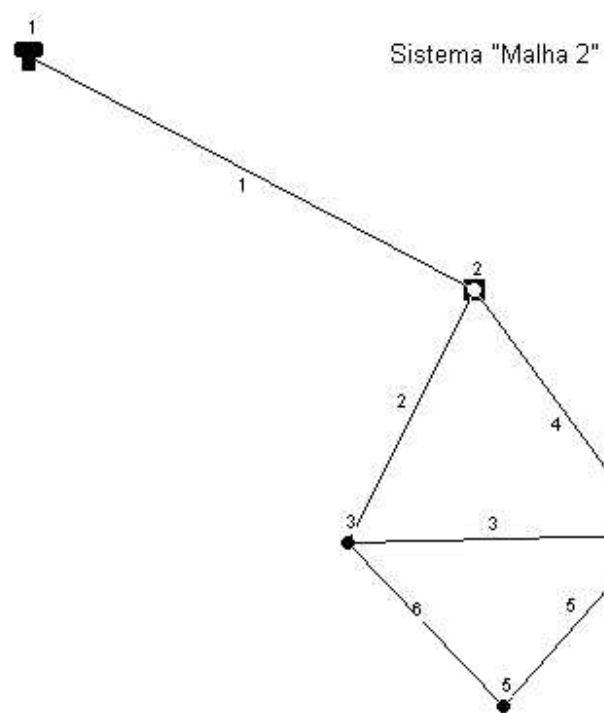


Figura 3.9: Sistema “*Malha 2*”.

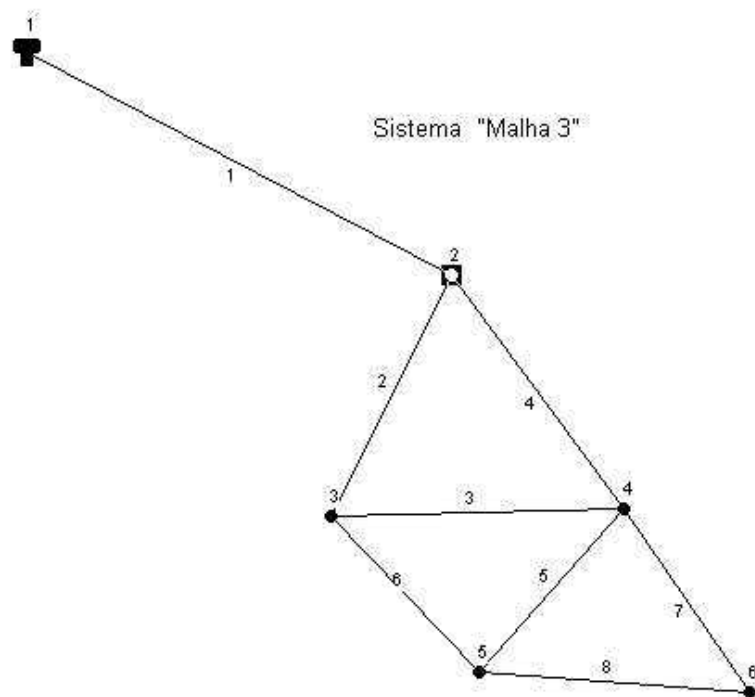


Figura 3.10: Sistema “*Malha 3*”.

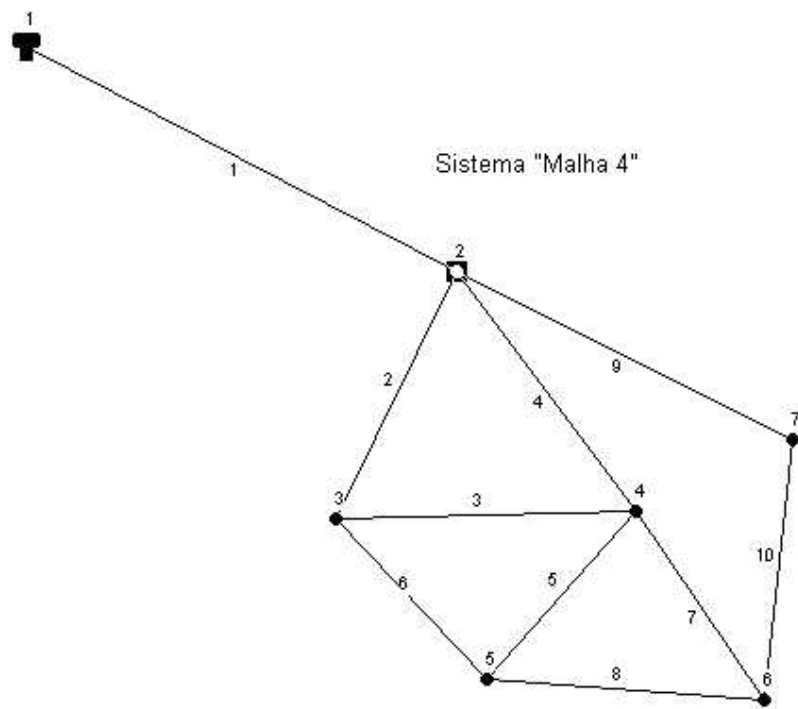


Figura 3.11: Sistema "Malha 4".

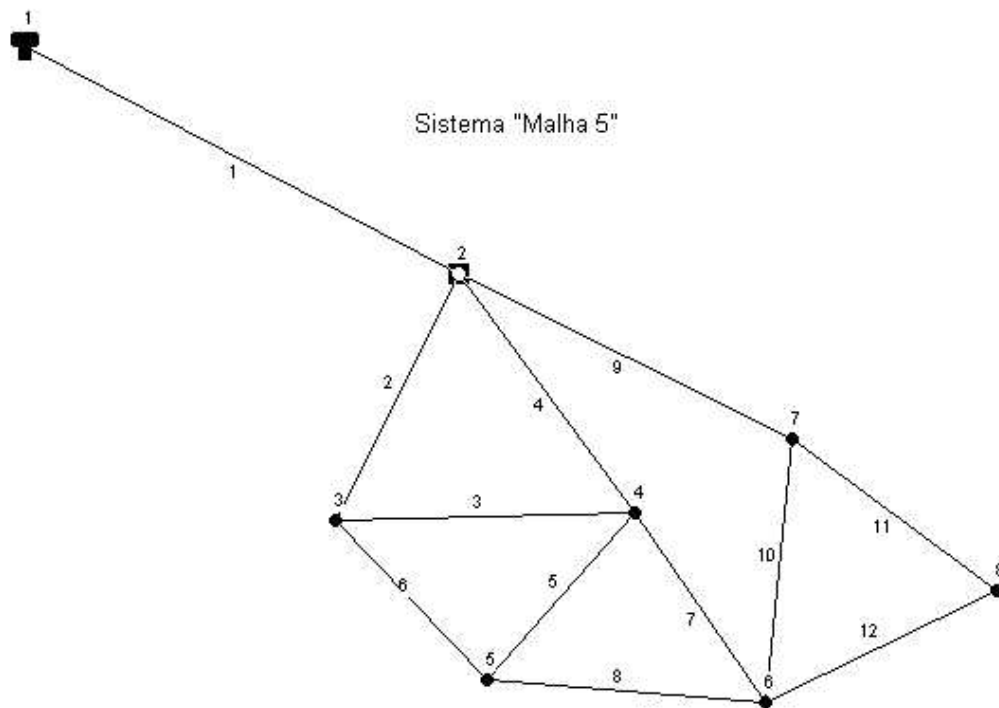


Figura 3.12: Sistema "Malha 5".

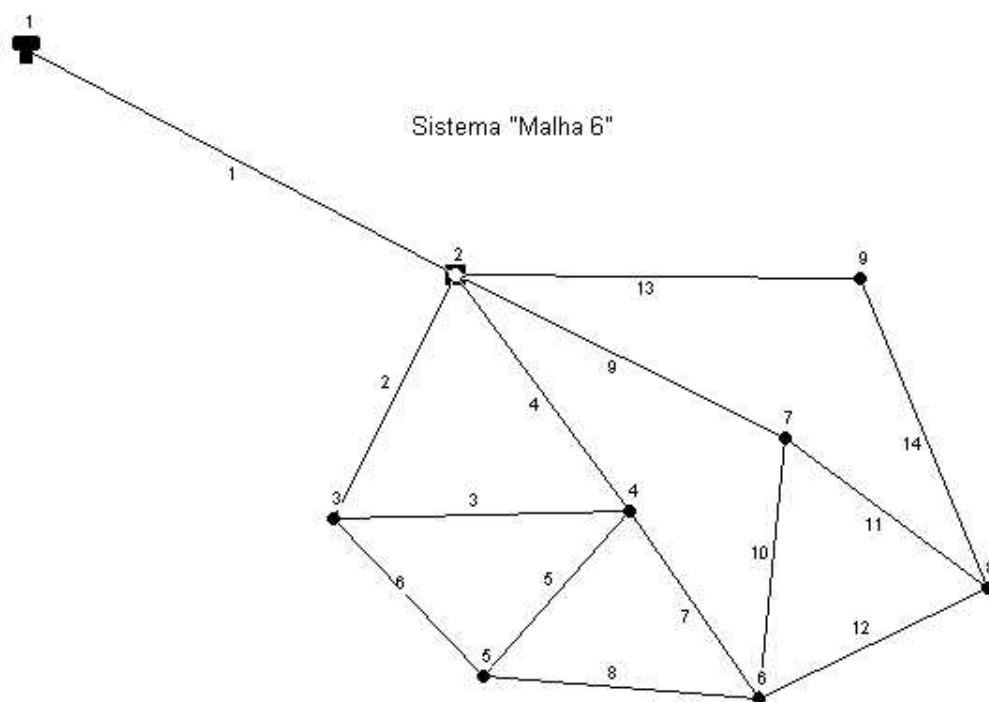


Figura 3.13: Sistema “*Malha 6*”.

3.1.9 Implementação do algoritmo

Por questões de memória e por questões também de tempo de processamento, o algoritmo foi implementado para 100 indivíduos de rugosidade, 13 indivíduos de consumo nos nós para cada tempo histórico de processamento, 24 simulações significativas por dia e 2 dias de histórico. Esta configuração serviu não só para as primeiras observações de resultados e primeiros ajustes de algoritmo, como também para a busca de todos os pequenos/grandes “*bug’s*” que, pela complexidade envolvida na programação, se puderam encontrar no desenvolvimento de implementação do algoritmo.

Foi esta implementação do cálculo que fez observar os resultados mais significativos e será esta configuração a ser usada, tendo em vista obterem-se as conclusões da tese. Os dados obtidos, desenrolando-se em pilhas brancas, isto é, ainda sem objectivarem tendências definidas relativamente aos objectivos em busca, permitiram ir-se acertando os condicionantes a imputar ao funcionamento do algoritmo e às características a implementar ao genético.

Como já referido, como abordagem geral, não interessou a multiplicidade de cambiantes possíveis de imputar ao algoritmo de optimização utilizado, na circunstância um algoritmo genético. Esta perspectiva decorre do facto de se entender mais importante e mais conveniente, centrar-se no presente momento a atenção na configuração de relacionamento observável entre as variáveis, estas sim as influências determinantes do mecanismo de que se pretende desenvolver aplicação.

O algoritmo genético de base implementado, todavia obedeceu a uma configu-

ração que foi essencialmente elitista e em que o melhor elemento obtido em cada momento e em cada análise regressiva de dados (quer de rugosidade, quer de consumo nos nós) é preservado continuamente na população das sucessivas gerações posteriores, ilimitadamente até ao descarte da população em causa (no caso do consumo nos nós), por antiguidade.

Esta posição decorre do facto de a um determinado valor de objectividade corresponderem inter-influências recíprocas entre consumos nos nós e rugosidades nas tubagens. Nomeadamente com consequência da evolução da máscara de amostragem e do estágio de evolução entre as duas variáveis inter-complementares.

Todavia, foi pressuposto que o cromossoma que possua maior aproximação às características do protótipo, resulte num maior valor de adequação (*fitness*), corporizado por uma medida de objectividade mais baixa, que qualquer outro menos próximo, independentemente do estágio de aproximação da variável complementar. Esta perspectiva decorre de se considerar válido para o sistema de análise, as conclusões contidas em Shamir (1968) [212], de continuidade e monotonia das funções envolvidas num sistema de distribuição de água.

Esta circunstância, aplicada à estrutura de aproximação concomitante e de desideratos correspondentes, por parte de ambas as variáveis complementares em análise, observa-se resultar em oscilações pontuais contrárias à convergência, que poderão se justificar por oscilações localizadas da aproximação entre a variável complementar e respectivo valor de protótipo.

Constata-se, nesta fase, que após o preenchimento inicial de dados, de forma aleatória, e iniciando-se o funcionamento em maior estabilização do programa, existirá o problema da perda de informação já processada, sempre que se imputar um novo conjunto de dados para o momento actual. Isto significa que o momento mais distante, ao ser aquele que apresenta maior investimento de cálculo realizado, é simplesmente descartado, logo que ocorra a próxima entrada de dados.

Esta situação observa-se como inaceitável, por se constituir como uma perda de informação e de cálculos, que o sistema não consegue superar. Os cálculos históricos, e consequente estrutura de populações desenvolvidas, não são despicientes, não podendo as suas consequências ser simplesmente descartadas, como era inicialmente pretensão para o caso da variável de consumo nos nós.

Para se obviar esta situação, e de certo modo reflectindo-se também o segundo postulado adoptado pela tese, que aceita a existência de um grau de aproximação entre consumos nos nós colocados próximos no tempo, importaria transferir entre momentos contíguos os melhores indivíduos que entretanto se encontrem seleccionados. A concretização desta necessidade do cálculo foi corporizada no que normalmente se designa, em processos estocásticos, por difusão, realizada entre as populações de consumos nos nós de momentos contíguos em análise. Isto implica que a cada uma das populações de consumo nos nós, relativa a cada tempo, fosse

acrescentado o “*melhor*” dos consumos nos nós apresentados no cálculo dos momentos temporais imediatamente anterior e posterior, substituindo-se com isso dois elementos determinados da população relativa a cada momento da totalidade da análise.

Também o melhor cromossoma de consumo nos nós é referenciado, sendo atribuído a todas as populações respectivas um seu exemplar replicado. Fecha-se assim um anel completo de difusão, não só entre momentos contíguos, mas também entre todos os momentos, que facilita a circulação dos melhores elementos de cálculo a todos os conjuntos populacionais em análise. Passa-se a observar unidade e inter-influência, ao conjunto em cálculo.

O mecanismo desenvolvido de difusão prenderá permanentemente, no interior das populações, os consumos nos nós que melhor se aproximem dos melhores objetivos que entretanto forem sendo alcançados, retendo na análise o essencial daquilo que, periodicamente, é necessário de descartar como registo histórico do sistema de calibração.

Na fase de trabalhos de verificação concretizada ainda não se conseguiu desenvolver os mecanismos de geração de dados de funcionamento respeitando as hipóteses de tese colocadas. A alternativa de implementação foi apenas dotada de um conjunto de rugosidades para cada tubo e de apenas um conjunto de consumos, para cada nó. Todavia a locação dos dispositivos de amostragem pretendia-se que fosse dinâmica, o que significava que a localização destes dispositivos era determinada em função da variância que fosse observada nos resultados dos diversos fenótipos de caudais (para as tubagens) e de pressões nos nós (para os nós), decorrentes das populações que, em cada momento, se encontrassem presentes para consumos nos nós e para rugosidades.

A corrida deste algoritmo implementado, para estas circunstâncias, permitiu a sedimentação de algumas constatações e implementações realizadas, também contribuindo para incrementar a depuração dos *bug's* de programação.

Ao fim de algum tempo de observação, decidiu-se reiniciar a análise como desenvolvida, utilizando-se um número gradual de nós e de tubos, até ao limite de 6 exemplos de redes ramificadas e 6 exemplos de redes malhadas, mais uma análise realizada sobre a rede proposta por Ormsbee, L. E., Wood, D. J. (1986) [171], representada na Figura (3.14). Principiou-se com dois nós, isto é, um reservatório, um tubo e um nó (o caso mais simples implementável de rede), e por aí fora, com redes de distribuição de água cada vez com mais elementos constitutivos e complexidade.

Para efeitos comparativos, e porque se impunha limitar no tempo uma análise que, por natureza, é infinita, optou-se por realizar 48 gerações de rugosidades de processamento. Esta escolha de extensão decorreu de corresponder a este número de gerações o tempo que tinha sido escolhido para o histórico da análise e, por princípio, dever-se estabilizar e atenuar a influência da geração aleatória inicial de

dados, através desse mesmo número de gerações.

Admitem-se como válidos todos os pressupostos de cálculo oferecidos pelo *EPA-NET* para redes de distribuição de água.

Transcrevem-se seguidamente os resultados finais e os gráficos obtidos após 48 gerações de rugosidade das condutas do programa implementado (isto é, o equivalente a dois dias de simulação do protótipo na corrida do algoritmo), sobre os exemplos nomeados, directamente da consola do *MATLAB*, transformando-se no final uma parte destes elementos num detalhe de apresentação e compilação de dados efectuada numa folha de cálculo MICROSOFT EXCEL.

3.1.10 Resultados obtidos

122

de água seleccionados para objecto de cálculo.

Sistema “*Ramos 1*”.

```

Valores do prototipo que melhor se aproximam, na perspectiva dos consumos nos nos:
dia = 1   hora = 1
mascara de reservatorios = [ 0 1 1 ]
mascara de amostragem actual = [ 1 0 0 ]
Prototipo:      =====
Consumo nos nos = [ 79.70000000000003 ];
Rugosidades    = [ 0.2000000000000001 ];
-
Pressoes       = [ 102.76020812988281          107.5 ];
Caudais        = [ 79.699998948242187 ].
Melhor elemento de modelo: =====
Consumo nos nos = [ 79.70000000000003 ];
Rugosidades     = [ 0.17454405232671213 ]
-
Pressoes        = [ 102.88238525390625          107.5 ];
Caudais         = [ 79.699998948242187 ].

-----
Geraçao_C = 48      Analise relativa ao momento 2 : 0 : 0 (d:h:m).
Geraçao_R = 48      Tempo total de algoritmo = 26 : 48.25 (m:s).
Distancia aparente da "melhor" conjugação de consumo nos nos e rugosidades( type = 2 ):
    "Menor" erro aparente (persp. do consumo nos nos) = 0.014927249634638429
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 0.014927249634638429
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 0
-
    "Menor" erro aparente (persp. media da rug.) = 0.014927249634638429
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 0.014927249634638429
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 0
-
    Distancia real do "melhor" elemento ao prot = 0.00064800527194517048
        contribuição dos consumos nos nos (ver dim.) = 0
        contribuição das rugosidades (ver dim.) = 0.00064800527194517048

-----

O PROGRAMA CORREU DURANTE 26 : 51.44 (m:s).
Foram integrados 48 ciclos de analise historica.
As gerações de consumo nos nos foram 2304.
As gerações de rugosidade foram 48;
>>

```

Figura 3.15: Resultado da consola de cálculo – Sistema “*Ramos 1*”.

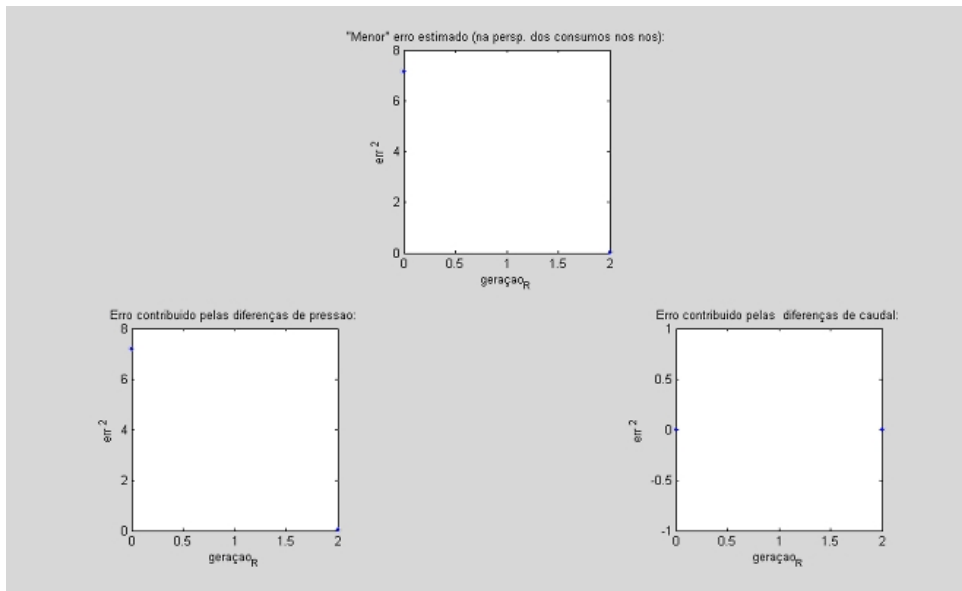


Figura 3.16: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema "Ramos 1").

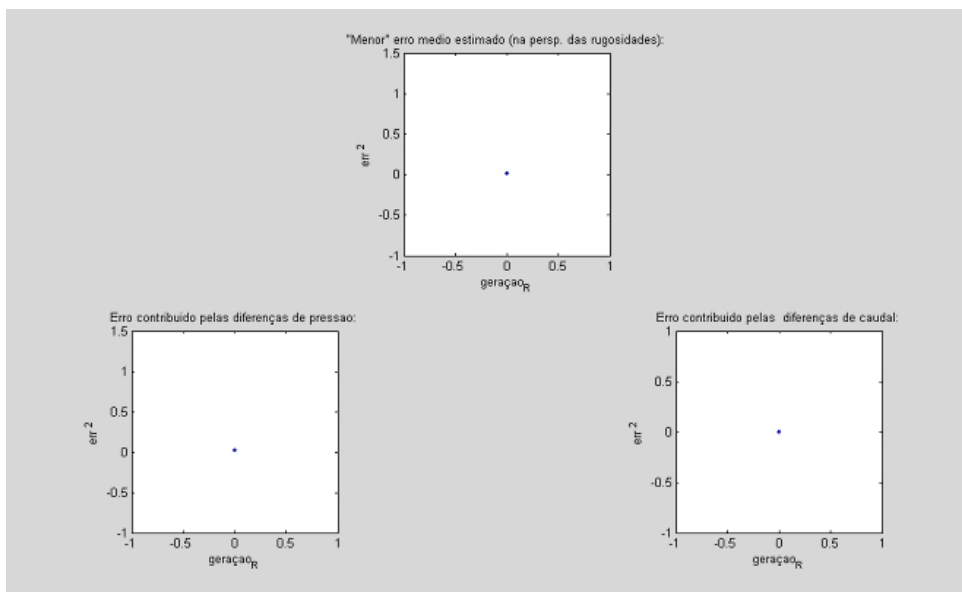


Figura 3.17: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema "Ramos 1").

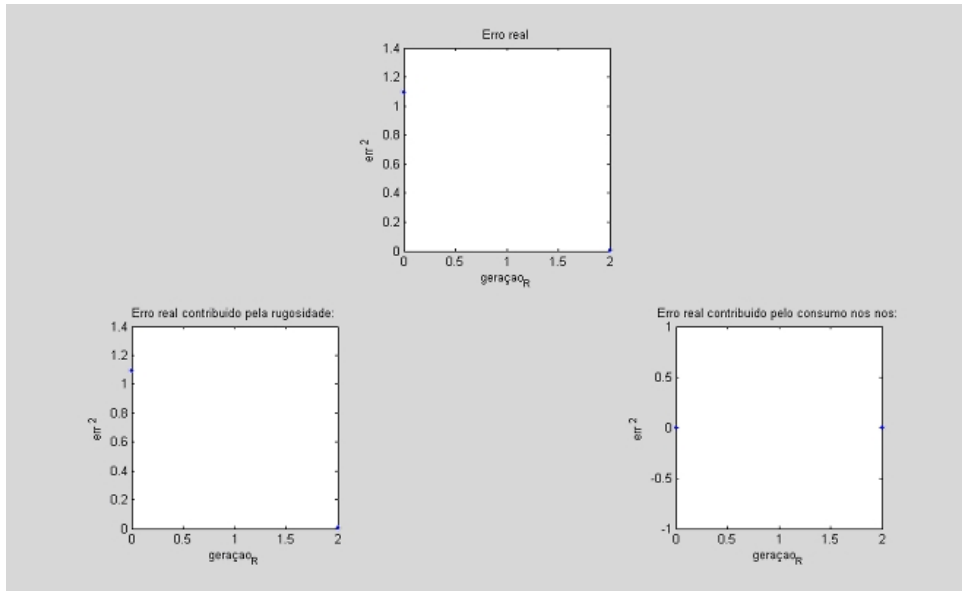


Figura 3.18: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva *real* (Sistema “*Ramos 1*”).

Tabela 3.3: Consumo nos nós (L/s), Sistema “*Ramos 1*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
79, 7	79, 7

Tabela 3.4: Rugosidades (mm), Sistema “*Ramos 1*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
0, 2	0, 174544052326712

Tabela 3.5: Pressões (mca), Sistema “*Ramos 1*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
102, 760208129882	102, 882385253906
107, 5	107, 5

Tabela 3.6: Caudais (L/s), Sistema “*Ramos 1*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
79, 6999969482421	79, 6999969482421

Sistema “*Ramos 2*”.

```

Valores do prototipo que melhor se aproximam, na perspectiva dos consumos nos nos:
dia = 1 hora = 21
mascara de reservatorios = [ 0 0 1 1 0 ]
mascara de amostragem actual = [ 1 1 0 0 1 ]
Prototipo: =====
Consumo nos nos = [ 79.70000000000003 98.70000000000003 ];
Rugosidades = [ 0.2000000000000001 0.2999999999999999 ];
-
Pressoes = [ 84.353202819824219 70.399185180664063 107.5 ];
Caudais = [ 178.39999389648437 98.699996948242188 ].
Melhor elemento de modelo: =====
Consumo nos nos = [ 79.915394921868241 98.484605078131764 ];
Rugosidades = [ 0.17454405232671213 0.4438137469038666 ];
-
Pressoes = [ 85.011016845703125 69.704636437988281 107.5 ];
Caudais = [ 178.4000915527344 98.484603881835938 ].

-----
Geraçao_C = 452 Analise relativa ao momento 2 : 0 : 0 (d:h:m).
Geraçao_R = 48 Tempo total de algoritmo = 40 : 10.5 (m:s).
Distancia aparente da "melhor" conjugação de consumo nos nos e rugosidades( type = 2 ):
    "Menor" erro aparente (persp. do consumo nos nos) = 0.96165034163277596
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 0.9152561683440581
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 0.046394173288717866
-
    "Menor" erro aparente (persp. media da rug.) = 1.4627928803784016
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 1.0034163276141044
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 0.45937655276429723
-
    Distancia real do "melhor" elemento ao prot. = 0.11412034380372371
        contribuição dos consumos nos nos (ver dim.) = 0.092789944733249141
        contribuição das rugosidades (ver dim.) = 0.021330399070474674

-----

O PROGRAMA CORREU DURANTE 40 : 16.7 (m:s).
Foram integrados 48 ciclos de analise historica.
As gerações de consumo nos nos foram 2304.
As gerações de rugosidade foram 48;
>>

```

Figura 3.19: Resultado da consola de cálculo – Sistema “*Ramos 2*”.

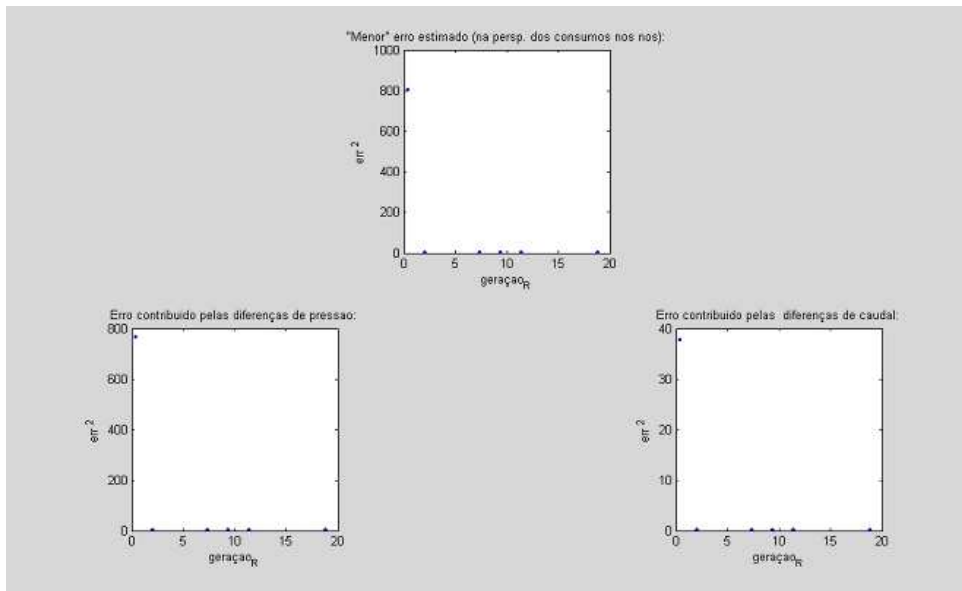


Figura 3.20: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “*Ramos 2*”).

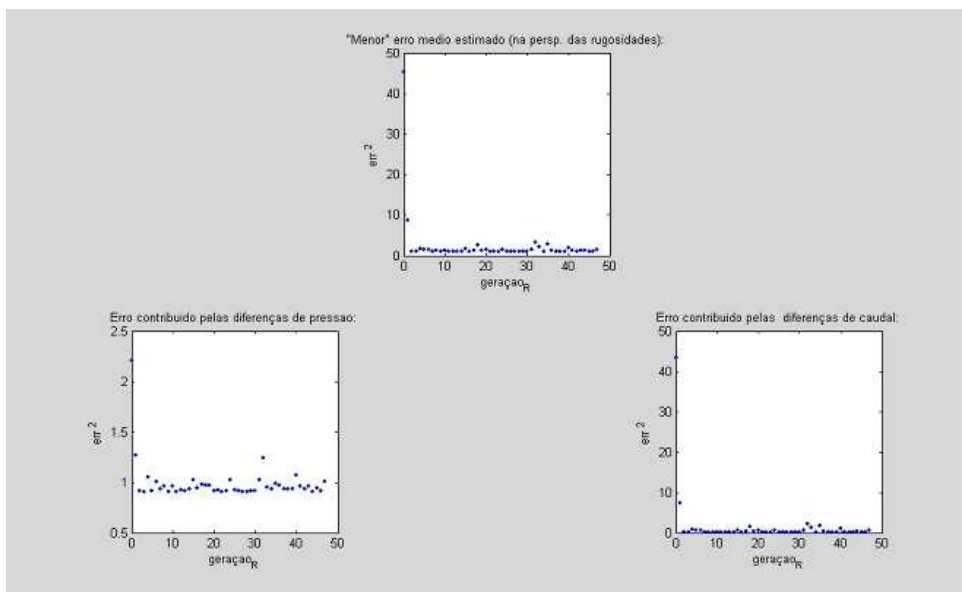


Figura 3.21: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “*Ramos 2*”).

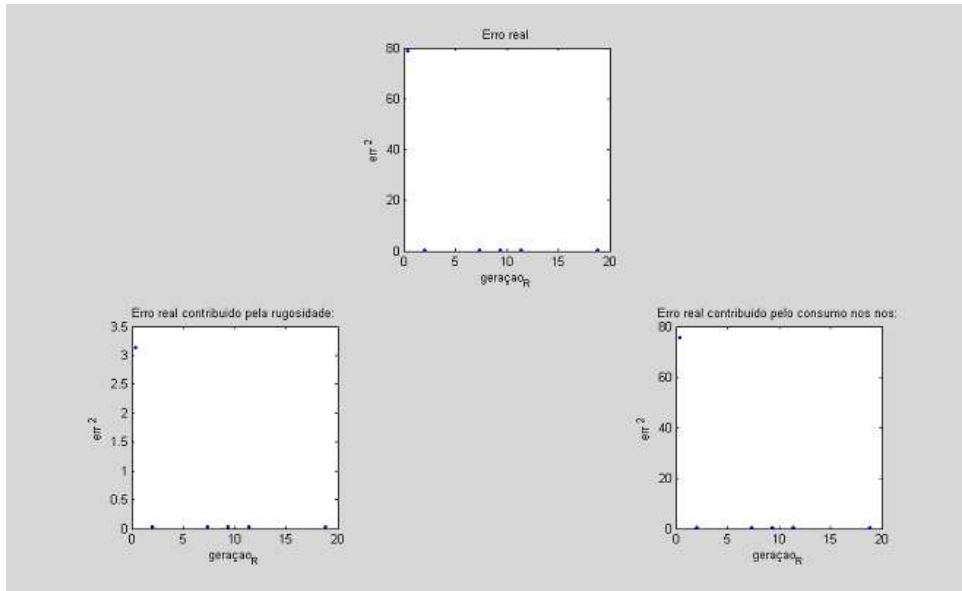


Figura 3.22: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva *real* (Sistema “*Ramos 2*”).

Tabela 3.7: Consumo nos nós (L/s), Sistema “*Ramos 2*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
79,7	79,9153949218682
98,7	98,4846050781317

Tabela 3.8: Rugosidades (mm), Sistema “*Ramos 2*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
0,2	0,174544052326712
0,3	0,443813746903866

Tabela 3.9: Pressões (mca), Sistema “*Ramos 2*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
84,3532028198242	85,0110168457031
70,399185180664	69,7045364379882
107,5	107,5

Tabela 3.10: Caudais (L/s), Sistema “*Ramos 2*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
178,399993896484	178,400009155273
98,6999969482421	98,4846038818359

Sistema “*Ramos 3*”.

```

Valores do prototipo que melhor se aproximam, na perspectiva dos consumos nos nos:
dia = 1   hora = 21
mascara de reservatorios = [ 0 0 0 1 1 0 0 ]
mascara de amostragem actual = [ 1 1 1 0 0 1 1 ]
Prototipo:      =====
Consumo nos nos = [ 79.70000000000003   98.70000000000003   59.29999999999997 ];
Rugosidades    = [ 0.2000000000000001   0.2999999999999999   0.2000000000000001 ];
-
Pressoes       = [ 66.645767211914063      31.146095275878906      30.140746162963867
107.5 ];
Caudais        = [ 237.69999694824219      158      59.299999237060547 ].
Melhor elemento de modelo: =====
Consumo nos nos = [ 81.511961672902444      96.989699775887075      59.198338551210462 ];
Rugosidades    = [ 0.17454405232671213      0.4438137469038666      1.0830268757543491 ];
-
Pressoes       = [ 67.833076477050781      29.534948348999023      28.044231414794922
107.5 ];
Caudais        = [ 237.69999694824219      156.18804931640625      59.198337554931641 ].

-----
Geraçao_C = 740      Análise relativa ao momento 2 : 0 : 0 (d:h:m).
Geraçao_R = 48      Tempo total de algoritmo = 50 : 46.45 (m:s).
Distancia aparente da "melhor" conjugação de consumo nos nos e rugosidades( type = 2 ):
    "Menor" erro aparente (persp. do consumo nos nos) = 11.694367984724522
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 8.4008676073353854
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 3.2935003773891367
-
    "Menor" erro aparente (persp. media da rug.) = 11.728329896419002
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 8.343331822987162
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 3.3849980734318401
-
Distancia real do "melhor" elemento ao prot. = 7.0197338732130934
    contribuição dos consumos nos nos (ver dim.) = 6.2186670108381321
    contribuição das rugosidades (ver dim.) = 0.80106688237496139

-----

O PROGRAMA CORREU DURANTE 50 : 52.38 (m:s).
Foram integrados 48 ciclos de análise histórica.
As gerações de consumo nos nos foram 2304.
As gerações de rugosidade foram 48;
>>

```

Figura 3.23: Resultado da consola de cálculo – Sistema “*Ramos 3*”.

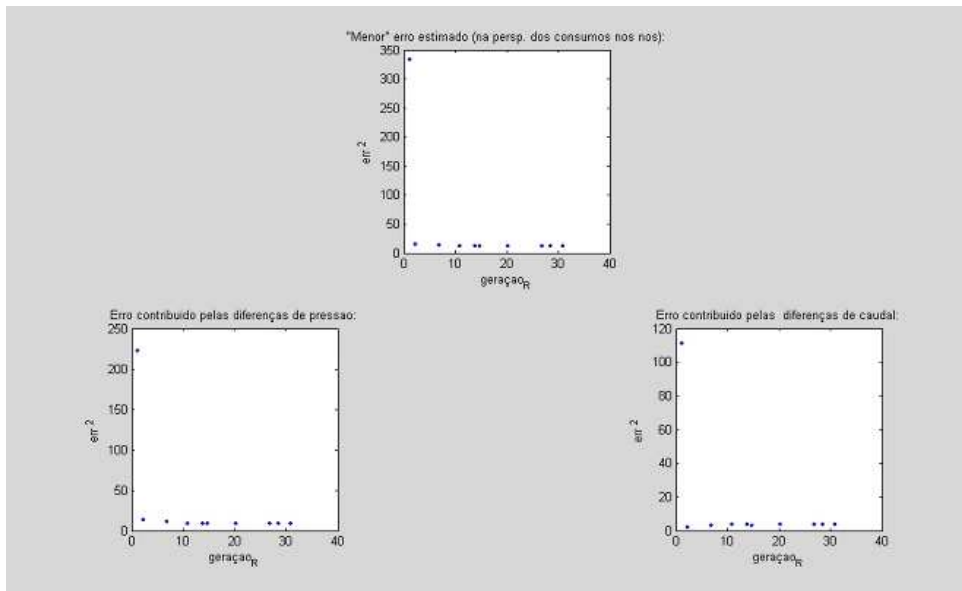


Figura 3.24: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “*Ramos 3*”).

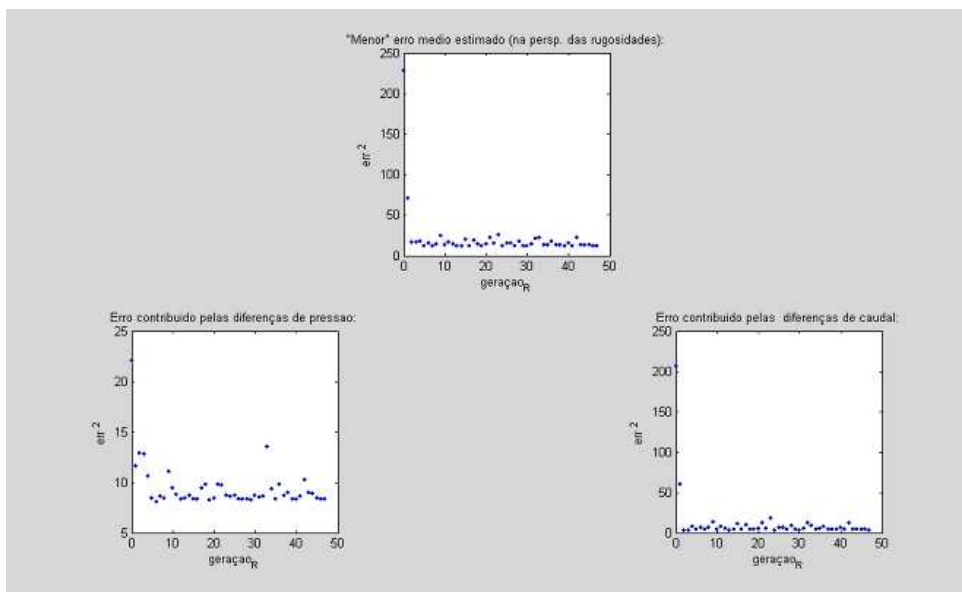


Figura 3.25: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “*Ramos 3*”).

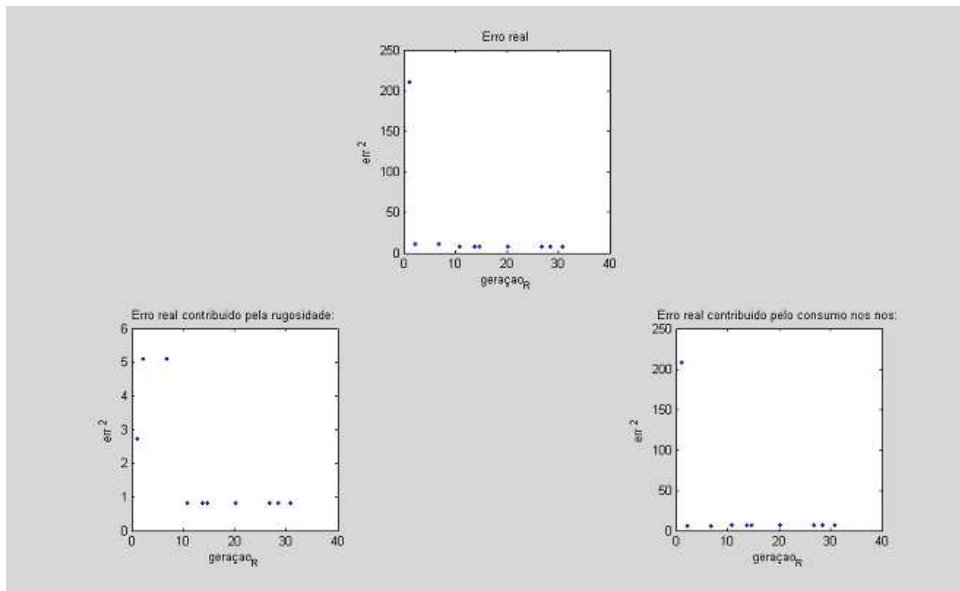


Figura 3.26: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva *real* (Sistema “*Ramos 3*”).

Tabela 3.11: Consumo nos nós (L/s), Sistema “*Ramos 3*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
79,7	81,5119616729024
98,7	96,989699775887
59,3	59,1983385512104

Tabela 3.12: Rugosidades (mm), Sistema “*Ramos 3*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
0,2	0,174544052326712
0,3	0,443813746903866
0,2	1,08302687575434

Tabela 3.13: Pressões (mca), Sistema “*Ramos 3*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
66,645767211914	67,8330764770507
31,1460952758789	29,534948348999
30,1407451629638	28,0442314147949
107,5	107,5

Tabela 3.14: Caudais (L/s), Sistema “*Ramos 3*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
237,699996948242	237,699996948242
158	156,188049316406
59,2999992370605	59,1983375549316

Sistema “*Ramos 4*”.

```

Valores do prototipo que melhor se aproximam, na perspectiva dos consumos nos nos:
dia = 1   hora = 14
mascara de reservatorios = [ 0 0 0 0 1 1 0 0 0 ]
mascara de amostragem actual = [ 1 1 1 1 0 0 1 1 1 ]
Prototipo:
=====
Consumo nos nos = [ 79.70000000000003      98.70000000000003      59.29999999999997
84];
Rugosidades      = [ 0.2000000000000001      0.2999999999999999      0.2000000000000001
0.6999999999999996 ];
-
Pressoes         = [ 33.026805877685547      -49.881080627441406      -55.553863525390625      -
59.451725006103516      107.5 ];
Caudais          = [ 321.70001220703125      241.99998474121094      143.29998779296875      -
84 ].
Melhor elemento de modelo: =====
Consumo nos nos = [ 87.540736014856719      92.170846832670676      58.605099616891813
83.383317535580801 ];
Rugosidades      = [ 0.17454405232671213      0.4438137469038666      1.5868353828257054
1.5268137793212753 ];
-
Pressoes         = [ 35.231636047363281      -50.580169677734375      -60.107894897460938      -
64.899848937988281      107.5 ];
Caudais          = [ 321.69998168945312      234.15927124023437      141.98841857910156      -
83.383316040039063 ].

-----
Geraçao_C = 1357      Analise relativa ao momento 2 : 0 : 0 (d:h:m).
Geraçao_R = 48      Tempo total de algoritmo = 1 : 4 : 20.39 (h:m:s).
Distancia aparente da "melhor" conjugação de consumo nos nos e rugosidades( type = 2):
    "Menor" erro aparente (persp. do consumo nos nos) = 119.34855880690156
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 55.771257692336803
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 63.577301114564762
-
    "Menor" erro aparente (persp. media da rug.) = 125.36256510793464
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 55.864212417538511
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 69.498352690396132
-
    Distancia real do "melhor" elemento ao prot. = 107.59842994628712
        contribuição dos consumos nos nos (ver dim.) = 104.9701661414838
        contribuição das rugosidades (ver dim.) = 2.6282638038033257

-----

O PROGRAMA CORREU DURANTE 1 : 4 : 22.69 (h:m:s).
Foram integrados 48 ciclos de analise historica.
As gerações de consumo nos nos foram 2304.
As gerações de rugosidade foram 48;
>>

```

Figura 3.27: Resultado da consola de cálculo – Sistema “*Ramos 4*”.

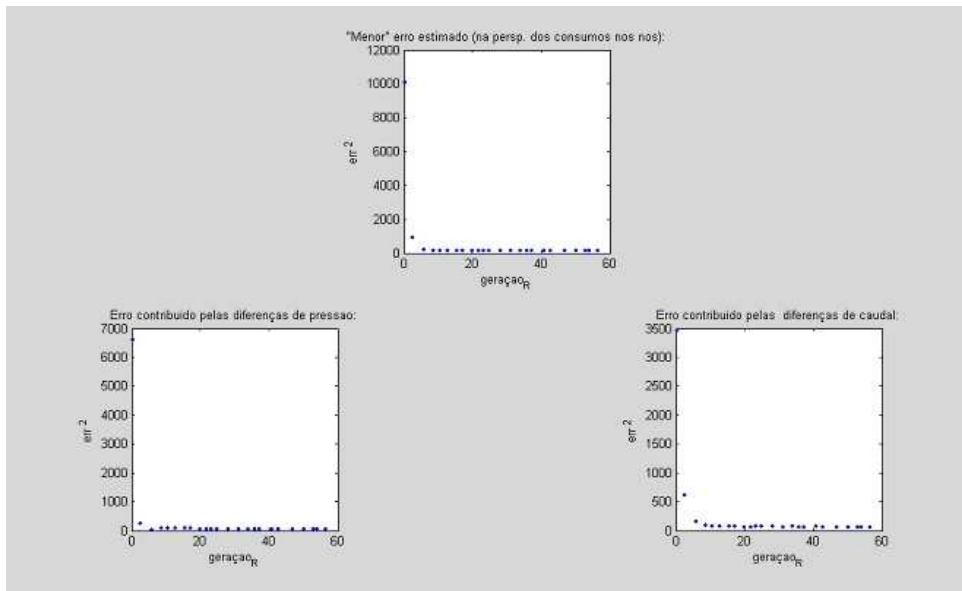


Figura 3.28: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “*Ramos 4*”).

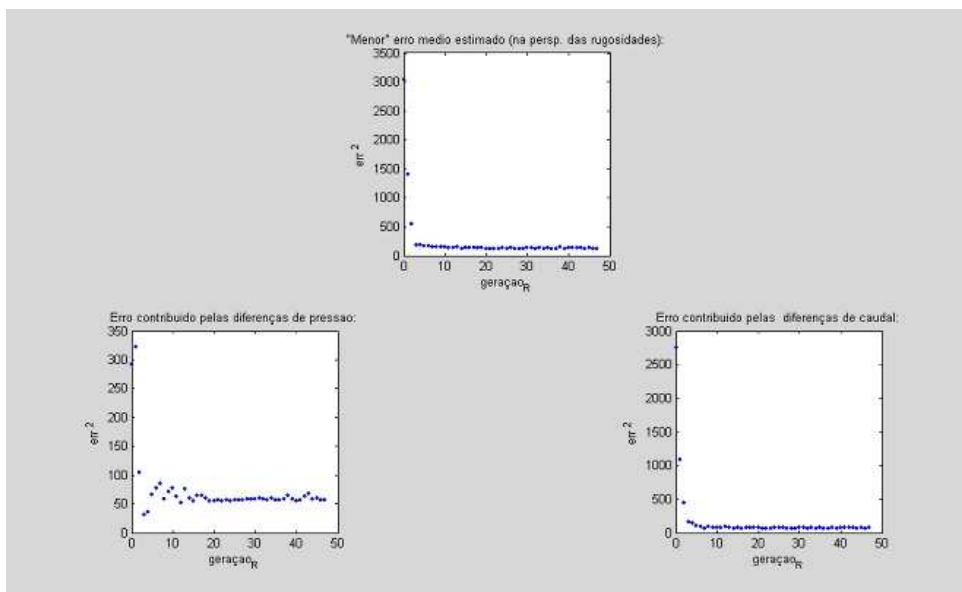


Figura 3.29: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “*Ramos 4*”).

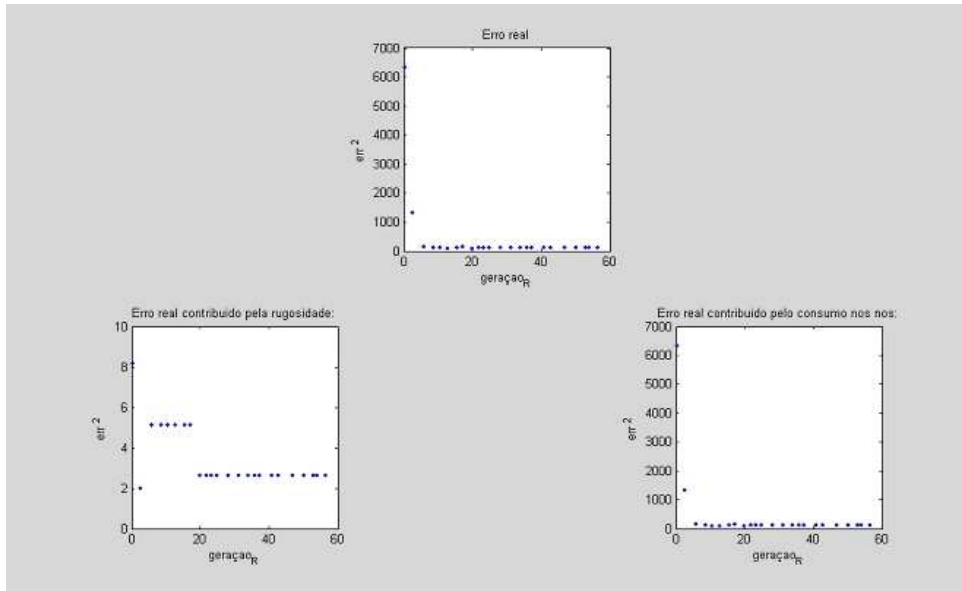


Figura 3.30: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva *real* (Sistema “*Ramos 4*”).

Tabela 3.15: Consumo nos nós (L/s), Sistema “*Ramos 4*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
79, 7	87, 5407360148567
98, 7	92, 1708468326706
59, 3	58, 6050996168918
84	83, 3833175355808

Tabela 3.16: Rugosidades (mm), Sistema “*Ramos 4*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
0, 2	0, 174544052326712
0, 3	0, 443813746903866
0, 2	1, 5868353828257
0, 7	1, 52681377932127

Tabela 3.17: Pressões (mca), Sistema “*Ramos 4*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
33, 0268058776855	35, 2316360473632
−49, 8810806274414	−50, 5801696777343
−55, 5538635253906	−60, 1078948974609
−59, 4517250061035	−64, 8998489379882
107, 5	107, 5

Tabela 3.18: Caudais (L/s), Sistema “*Ramos 4*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
321,700012207031	321,699981689453
241,99998474121	234,159271240234
143,299987792968	141,988418579101
–84	–83,383316040039

Sistema “*Ramos 5*”.

```

Valores do prototipo que melhor se aproximam, na perspectiva dos consumos nos nos:
dia = 2   hora = 5
mascara de reservatorios = [ 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 ]
mascara de amostragem actual = [ 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 ]
Prototipo:      =====
Consumo nos nos = [ 79.700000000000003      98.700000000000003      59.299999999999997
84  88.900000000000006 ];
Rugosidades      = [ 0.20000000000000001      0.29999999999999999      0.20000000000000001
0.69999999999999996  0.20000000000000001 ];
-
Pressoes          = [ -13.450067520141602      -168.09159851074219      -182.82569885253906
199.2012939453125      -206.23832702636719      107.5 ];
Caudais           = [ 410.60000610351562      330.89999389648438      232.20001220703125
172.90000915527344      88.900001525878906 ];
Melhor elemento de modelo: =====
Consumo nos nos = [ 93.765267580443449      86.70122620790039      58.514403489415329
82.74290433194146      88.876198390299407 ];
Rugosidades      = [ 0.16194926845809068      0.51326136553377566      0.38969152752142894
0.51871559699048919      0.40073398235612101 ];
-
Pressoes          = [ -7.9137983322143555      -170.97767639160156      -187.88819885253906
202.79794311523437      -211.07052612304687      107.5 ];
Caudais           = [ 410.60000610351562      316.834716796875      230.13351440429688
171.61909484863281      88.876197814941406 ];

-----
Geraçao_C = 2284      Analise relativa ao momento 2 : 0 : 0 (d:h:m).
Geraçao_R = 48      Tempo total de algoritmo = 1 : 19 : 17.28 (h:m:s).
Distancia aparente da "melhor" conjugação de consumo nos nos e rugosidades( type = 2):
    "Menor" erro aparente (persp. do consumo nos nos) = 304.63840280214299
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 100.89466166703005
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 203.74374113511294
-
    "Menor" erro aparente (persp. media da rug.) = 353.52849636878017
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 100.43134910904503
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 253.09714725973512
-
    Distancia real do "melhor" elemento ao prot. = 344.15641184642942
        contribuição dos consumos nos nos (ver dim.) = 344.00034253616872
        contribuição das rugosidades (ver dim.) = 0.15606931026068038

-----

O PROGRAMA CORREU DURANTE 1 : 19 : 21.59 (h:m:s).
Foram integrados 48 ciclos de analise historica.
As gerações de consumo nos nos foram 2304.
As gerações de rugosidade foram 48;
>>

```

Figura 3.31: Resultado da consola de cálculo – Sistema “*Ramos 5*”.

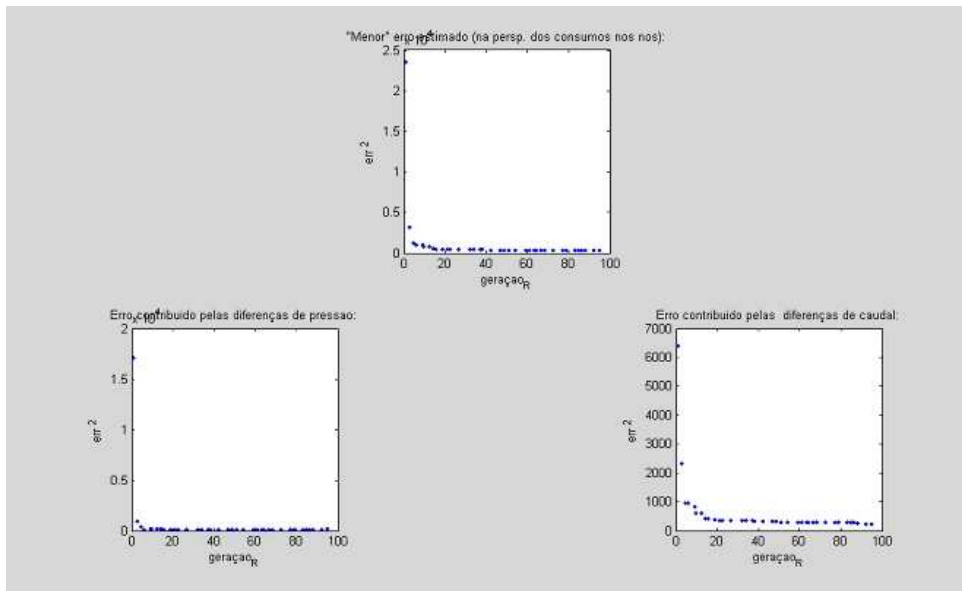


Figura 3.32: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “*Ramos 5*”).

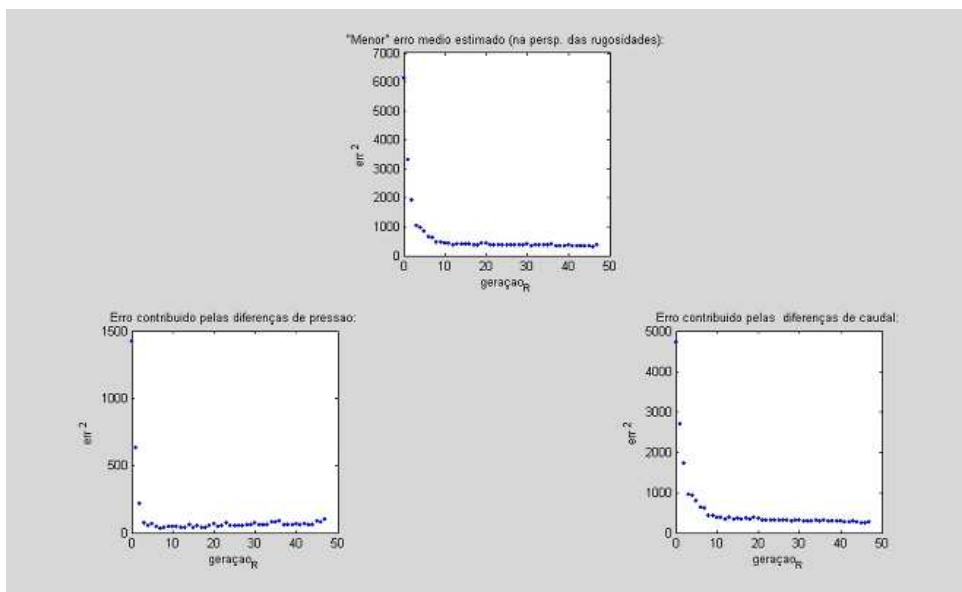


Figura 3.33: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “*Ramos 5*”).

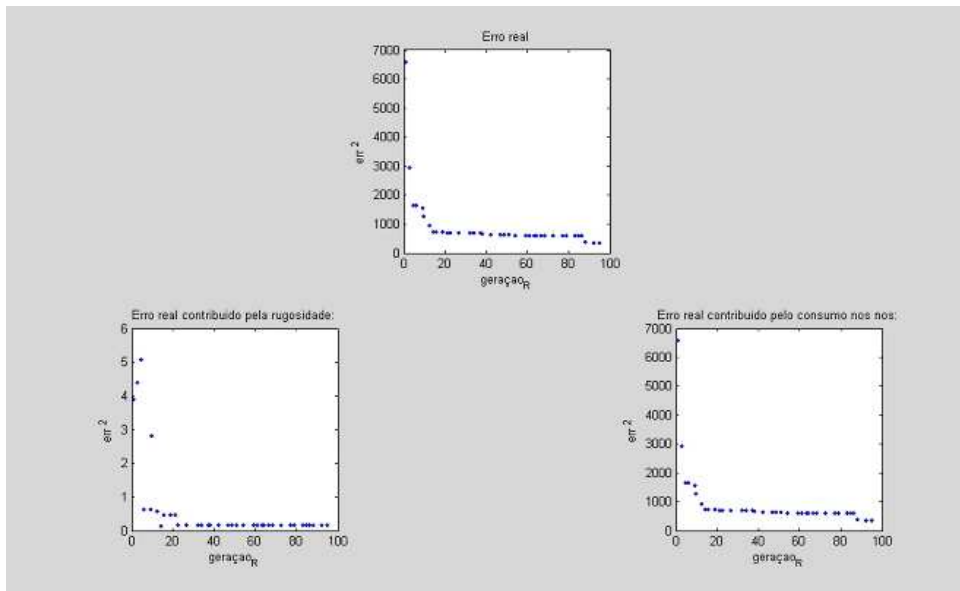


Figura 3.34: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva *real* (Sistema “Ramos 5”).

Tabela 3.19: Consumo nos nós (L/s), Sistema “Ramos 5”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
79, 7	93, 7652675804434
98, 7	86, 7012262079003
59, 3	58, 5144034894153
84	82, 7429043319414
88, 9	88, 8761983902994

Tabela 3.20: Rugosidades (mm), Sistema “Ramos 5”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
0, 2	0, 16194926845809
0, 3	0, 513261365533775
0, 2	0, 389691527521428
0, 7	0, 518715596990489
0, 2	0, 400733982356121

Tabela 3.21: Pressões (mca), Sistema “Ramos 5”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
−13, 4500675201416	−7, 91379833221435
−168, 091598510742	−170, 977676391601
−182, 825698852539	−187, 888198852539
−199, 201293945312	−202, 797943115234
−206, 238327026367	−211, 070526123046

Tabela 3.22: Caudais (L/s), Sistema “*Ramos 5*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
410,600006103515	410,600006103515
330,899993896484	316,834716796875
232,200012207031	230,133514404296
−172,900009155273	−171,619094848632
88,9000015258789	88,8761978149414

Sistema “*Ramos 6*”.

```

Valores do prototipo que melhor se aproximam, na perspectiva dos consumos nos nos:
dia = 1 hora = 21
mascara de reservatorios = [ 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 ]
mascara de amostragem actual = [ 1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 ]
Prototipo: =====
Consumo nos nos = [ 79.70000000000003      98.70000000000003      59.29999999999997
84 88.90000000000006 57.20000000000003 ];
Rugosidades      = [ 0.2000000000000001    0.2999999999999999    0.2000000000000001
0.6999999999999996 0.2000000000000001    0.2000000000000001 ];
-
Pressoes         = [ -49.277599334716797    -261.7943115234375    -294.59768676757812   -
313.53903198242187    -332.32839965820313    -334.93719482421875    107.5 ];
Caudais          = [ 467.79998779296875     388.10000610351562     289.4000244140625    -
230.10000610351562    146.10000610351562    57.200000762939453 ].
Melhor elemento de modelo: =====
Consumo nos nos = [ 107.62214666246516      76.255419049090065      60.681374342559721
87.14174544660311    83.526200090691376    52.573114408590605 ];
Rugosidades      = [ 0.32974629654783338     0.29876838111382809     1.7254530610947505
0.49809850050306703    1.6466764633989308    0.56821394459278451 ];
-
Pressoes         = [ -68.939010620117188     -251.86924743652344     -290.87728881835937   -
315.77935791015625     -344.76617431640625     -347.58456420898437    107.5 ];
Caudais          = [ 467.80001831054687     360.17788696289062     283.92245483398438    -
223.24105834960937     136.09931945800781    52.573116302490234 ].

-----
Geraçao_C = 2276      Analise relativa ao momento 2 : 0 : 0 (d:h:m).
Geraçao_R = 48      Tempo total de algoritmo = 1 : 31 : 47.91 (h:m:s).
Distancia aparente da "melhor" conjugação de consumo nos nos e rugosidades( type = 2 ):
    "Menor" erro aparente (persp. do consumo nos nos) = 1822.3001071362087
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 844.18464384462277
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 978.11546329158591
-
    "Menor" erro aparente (persp. media da rug.) = 1885.3317975827581
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 866.48574603096984
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 1018.8460515517882
-
    Distancia real do "melhor" elemento ao prot. = 1350.0831047431745
        contribuição dos consumos nos nos (ver dim.) = 1345.470043568974
        contribuição das rugosidades (ver dim.) = 4.6130611742004302

-----

O PROGRAMA CORREU DURANTE 1 : 31 : 50.77 (h:m:s).
Foram integrados 48 ciclos de analise historica.
As gerações de consumo nos nos foram 2304.
As gerações de rugosidade foram 48;
>>

```

Figura 3.35: Resultado da consola de cálculo – Sistema “*Ramos 6*”.

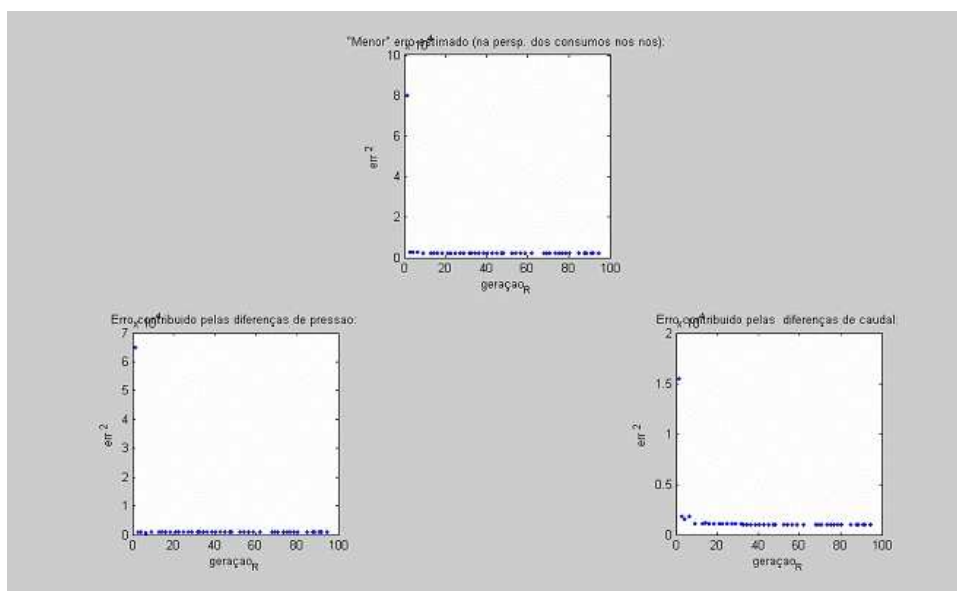


Figura 3.36: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “*Ramos 6*”).

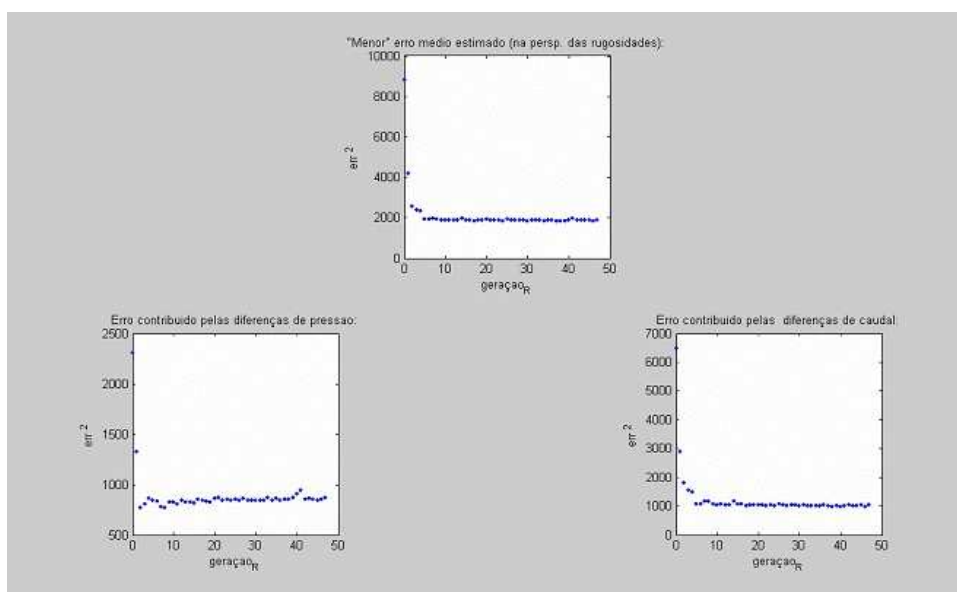


Figura 3.37: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “*Ramos 6*”).

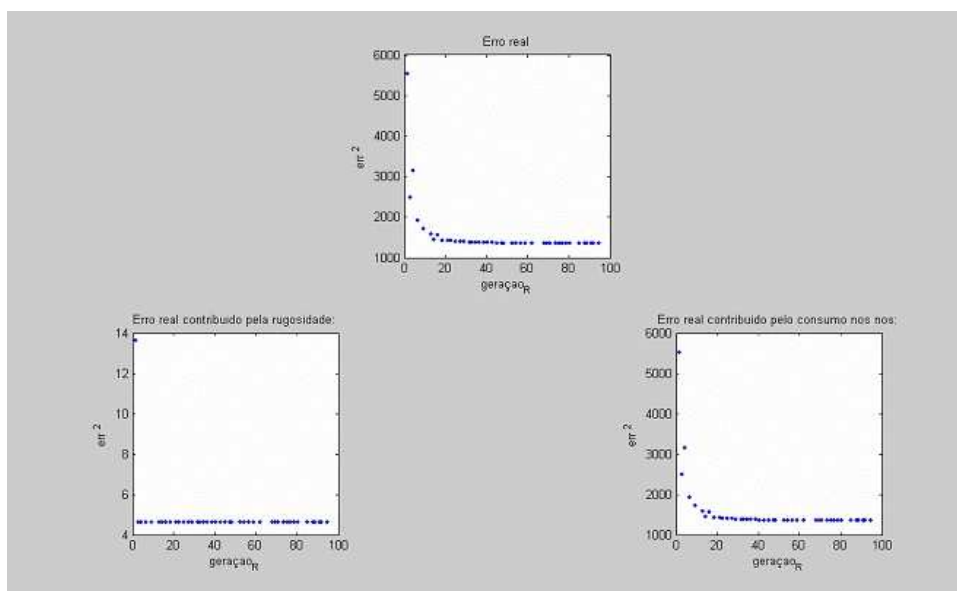


Figura 3.38: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva *real* (Sistema “*Ramos 6*”).

Tabela 3.23: Consumo nos nós (L/s), Sistema “*Ramos 6*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
79,7	107,622146662465
98,7	76,25541904909
59,29999999999999	60,6813743425597
84	87,1417454466031
88,9	83,5262000906913
57,2	52,5731144085906

Tabela 3.24: Rugosidades (mm), Sistema “*Ramos 6*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
0,2	0,329746296547833
0,3	0,298768381113828
0,2	1,72545306109475
0,7	0,498098500503067
0,2	1,64667646339893
0,2	0,568213944592784

Tabela 3.25: Pressões (mca), Sistema “*Ramos 6*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
−49,2775993347167	−68,9390106201171
−261,794311523437	−251,869247436523
−284,597686767578	−290,877288818359
−313,539031982421	−315,779357910156
−332,328399658203	−344,766174316406
−334,937194824218	−347,584564208984
107,5	107,5

Tabela 3.26: Caudais (L/s), Sistema “*Ramos 6*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
410,600006103515	410,600006103515
330,899993896484	316,834716796875
232,200012207031	230,133514404296
−172,900009155273	−171,619094848632
88,9000015258789	88,8761978149414

Sistema “Malha 1”.

```

Valores do prototipo que melhor se aproximam, na perspectiva dos consumos nos nos:
dia = 1 hora = 22
mascara de reservatorios = [ 0 0 0 1 1 0 0 0 ]
mascara de amostragem actual = [ 1 1 1 0 0 1 1 1 ]
Prototipo: =====
Consumo nos nos = [ 79.70000000000003 98.70000000000003 59.29999999999997 ];
Rugosidades = [ 0.2000000000000001 0.2999999999999999 0.2000000000000001
0.6999999999999996 ];
-
Pressoes = [ 66.645767211914063 61.13165283203125 61.534549713134766
107.5 ];
Caudais = [ 237.69999694824219 61.713687896728516 -36.986305236816406
96.286308288574219 ];
Melhor elemento de modelo: =====
Consumo nos nos = [ 80.115658975075718 98.234500853341686 59.349840171582599 ];
Rugosidades = [ 0.17464405232671213 1.0650521455257858 2.4625664741573684
1.8709326487886575 ];
-
Pressoes = [ 67.833076477050781 60.267524719238281 61.02008087158203
107.5 ];
Caudais = [ 237.69999694824219 61.197479248046875 -37.037017822265625
96.386856079101563 ];

-----
Geraçao_C = 1989 Analise relativa ao momento 2 : 0 : 0 (d:h:m).
Geraçao_R = 48 Tempo total de algoritmo = 55 : 31.39 (m:s).
Distancia aparente da "melhor" conjugação de consumo nos nos e rugosidades( type = 2 ):
    "Menor" erro aparente (persp. do consumo nos nos) = 2.7003267647378379
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 2.4211737712612376
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 0.27915299347660039
-
    "Menor" erro aparente (persp. media da rug.) = 3.5917667811027059
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 2.4611027613494421
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 1.130664019753264
-
    Distancia real do "melhor" elemento ao prot. = 7.4229926097170473
        contribuição dos consumos nos nos (ver dim.) = 0.39194588180399825
        contribuição das rugosidades (ver dim.) = 7.0310467279130489

-----

O PROGRAMA CORREU DURANTE 55 : 33.98 (m:s).
Foram integrados 48 ciclos de analise historica.
As gerações de consumo nos nos foram 2304.
As gerações de rugosidade foram 48;
>>

```

Figura 3.39: Resultado da consola de cálculo – Sistema “Malha 1”.

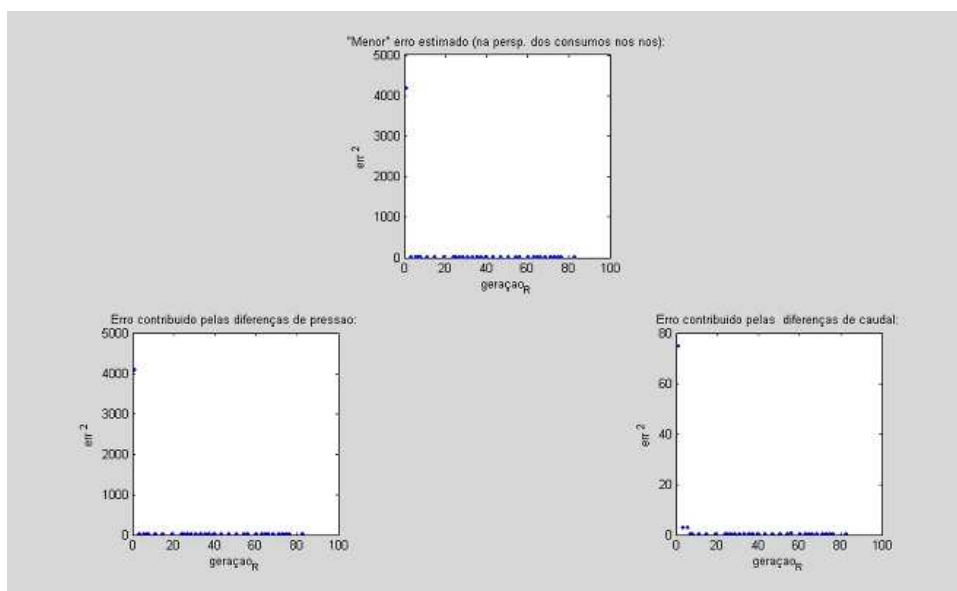


Figura 3.40: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “*Malha 1*”).

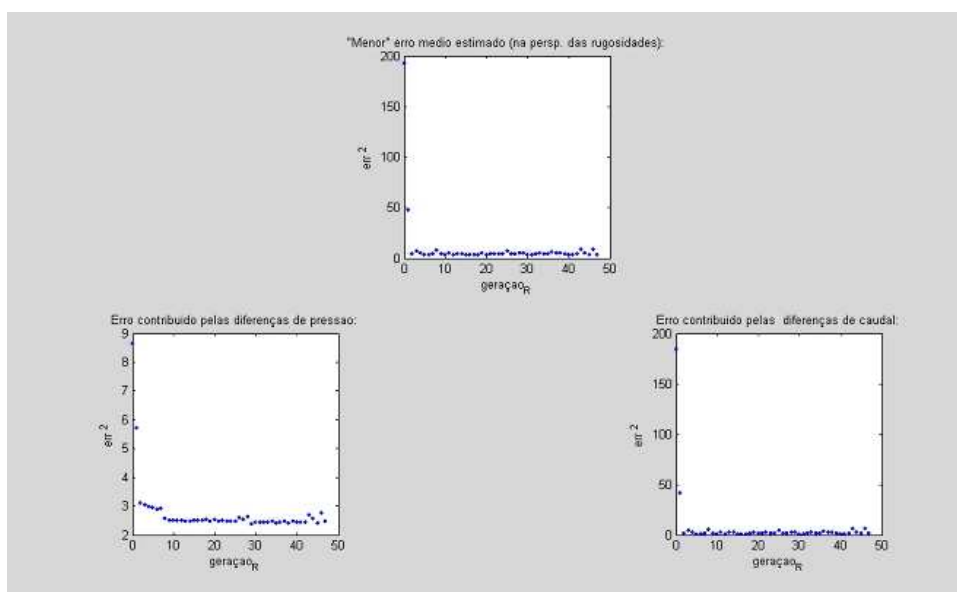


Figura 3.41: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “*Malha 1*”).

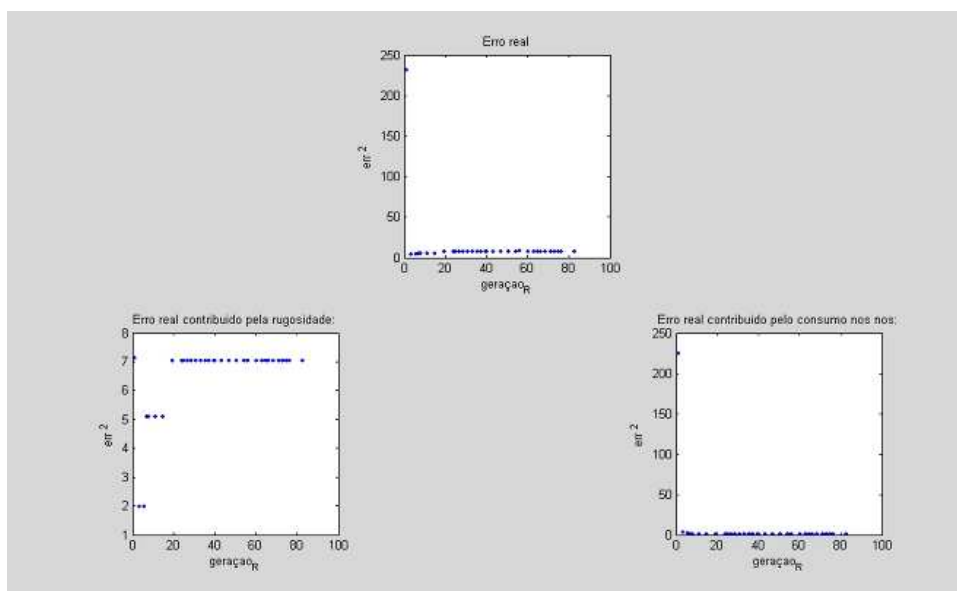


Figura 3.42: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva *real* (Sistema “*Malha 1*”).

Tabela 3.27: Consumo nos nós (L/s), Sistema “*Malha 1*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
79,7	80,1156589750757
98,7	98,2345008533416
59,29999999999999	59,3498401715825

Tabela 3.28: Rugosidades (mm), Sistema “*Malha 1*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
0,2	0,174544052326712
0,2999999999999999	1,06505214552578
0,2	2,45255647415736
0,6999999999999999	1,87093264878865

Tabela 3.29: Pressões (mca), Sistema “*Malha 1*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
66,645767211914	67,8330764770507
61,1316528320312	60,2675247192382
61,5345497131347	61,0200080871582
107,5	107,5

Tabela 3.30: Caudais (L/s), Sistema “*Malha 1*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
66,645767211914	67,8330764770507
61,1316528320312	60,2675247192382
61,5345497131347	61,0200080871582
107,5	107,5

Sistema “Malha 2”.

```

Valores do prototipo que melhor se aproximam, na perspectiva dos consumos nos nos:
dia = 1 hora = 12
mascara de reservatorios = [ 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 ]
mascara de amostragem actual = [ 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 ]
Prototipo: =====
Consumo nos nos = [ 79.700000000000003      98.700000000000003      59.299999999999997
84];
Rugosidades      = [ 0.20000000000000001      0.29999999999999999      0.20000000000000001
0.69999999999999996      0.20000000000000001      0.20000000000000001 ];
-
Pressoes         = [ 33.026798248291016      20.410755157470703      20.97955322265625
19.156461715698242      107.5];
Caudais          = [ 321.70001220703125      93.802833557128906      -44.219043731689453
148.19715881347656      44.678115844726563      -39.321880340576172 ].
Melhor elemento de modelo: =====
Consumo nos nos = [ 79.810165024297049      97.078296702126309      60.323923900180056
84.487614373396568 ];
Rugosidades      = [ 0.17454405232671213      0.4438137469038666      0.35800512493735531
0.7915273560646694      0.34259984813147315      0.35846085384350929 ];
-
Pressoes         = [ 35.231620788574219      21.850910186767578      22.496192932128906
20.420730590820313      107.5];
Caudais          = [ 321.70004272460937      92.036842346191406      -44.522418975830078
149.85299682617187      45.00665283203125      -39.480964660644531 ].

-----
Geraçao_C = 2027      Analise relativa ao momento 2 : 0 : 0 (d:h:m).
Geraçao_R = 48      Tempo total de algoritmo = 1 : 18 : 0.23 (h:m:s).
Distancia aparente da "melhor" conjugação de consumo nos nos e rugosidades( type = 2 ):
    "Menor" erro aparente (persp. do consumo nos nos) = 16.919666133504506
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 10.833860739501688
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 6.0858053940028185
-
    "Menor" erro aparente (persp. media da rug.) = 18.617634830544979
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 11.019983342697438
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 7.5976514878475427
-
    Distancia real do "melhor" elemento ao prot. = 4.0283636837887187
        contribuição dos consumos nos nos (ver dim.) = 3.9282458494166529
        contribuição das rugosidades (ver dim.) = 0.10011783437306583

-----

O PROGRAMA CORREU DURANTE 1 : 18 : 3.34(h:m:s).
Foram integrados 48 ciclos de analise historica.
As gerações de consumo nos nos foram 2304.
As gerações de rugosidade foram 48;
>>

```

Figura 3.43: Resultado da consola de cálculo – Sistema “Malha 2”.

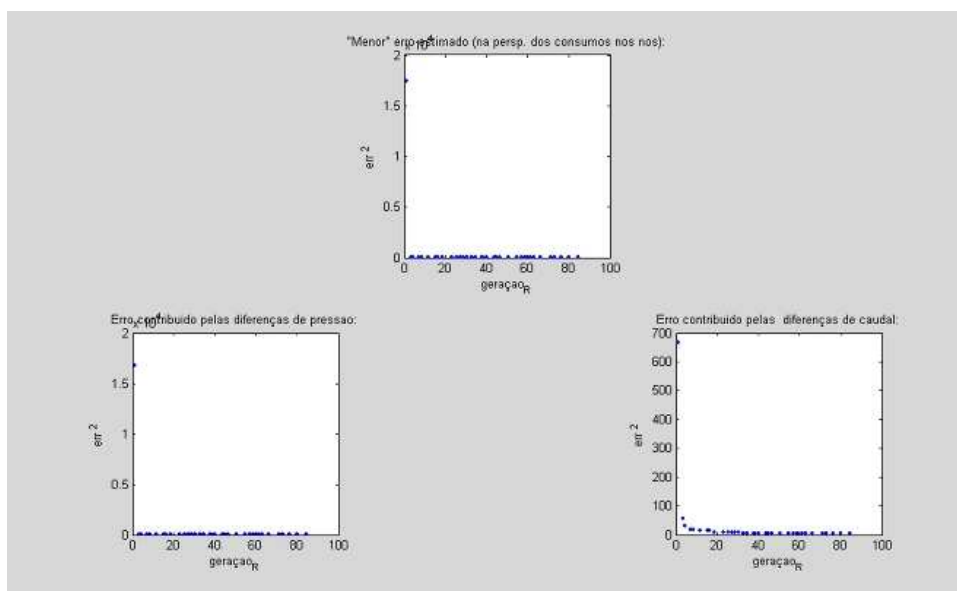


Figura 3.44: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “*Malha 2*”).

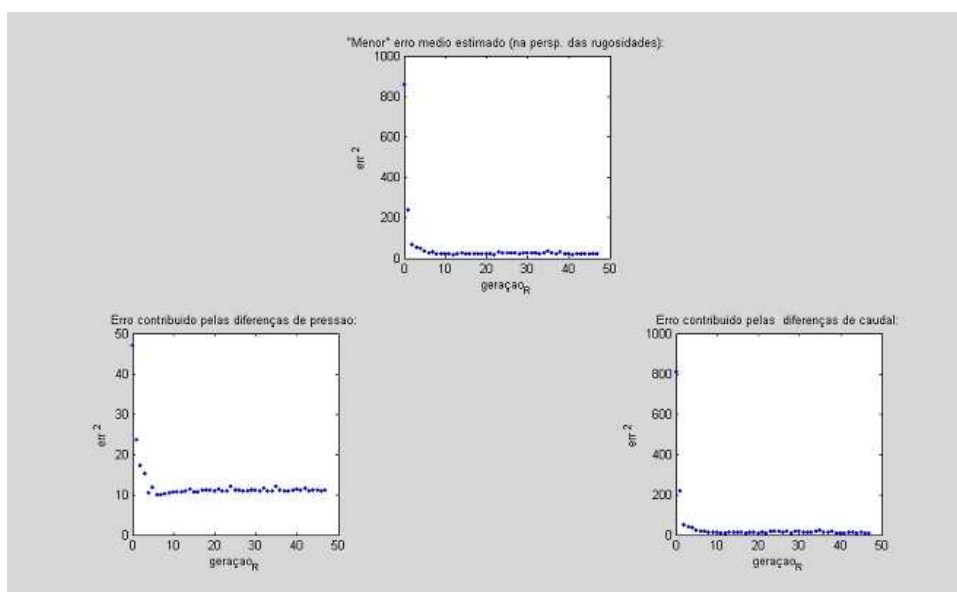


Figura 3.45: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “*Malha 2*”).

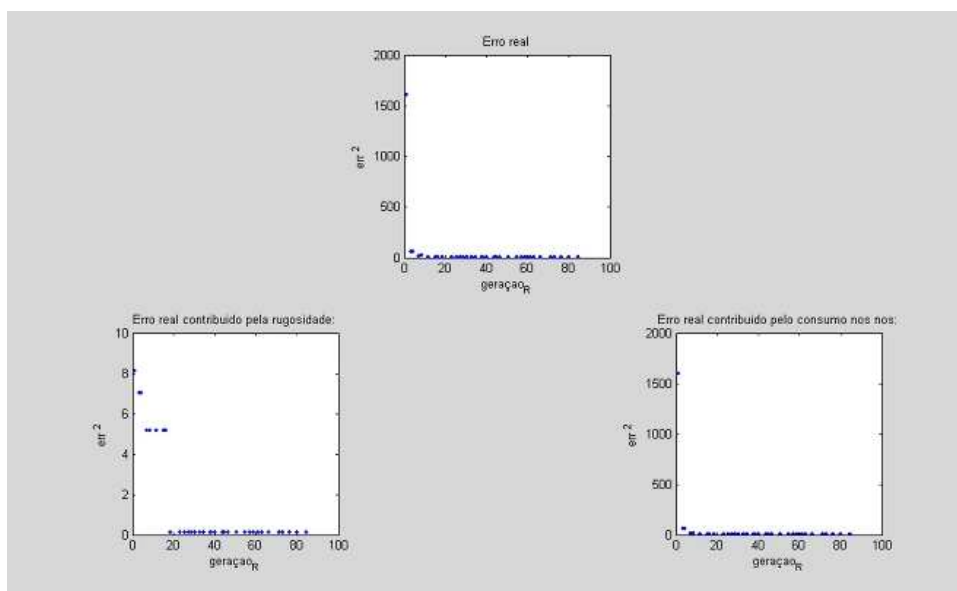


Figura 3.46: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva *real* (Sistema “Malha 2”).

Tabela 3.31: Consumo nos nós (L/s), Sistema “Malha 2”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
79,7	79,810165024297
98,7	97,0782967021263
59,29999999999999	60,32392390018
84	84,4876143733965

Tabela 3.32: Rugosidades (mm), Sistema “Malha 2”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
0,2	0,174544052326712
0,2999999999999999	0,443813746903866
0,2	0,358005124937355
0,6999999999999999	0,791527356064669
0,2	0,342599848131473
0,2	0,358460853843509

Tabela 3.33: Pressões (mca), Sistema “Malha 2”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
33,026798248291	35,2316207885742
20,4107551574707	21,8509101867675
20,9795532226562	22,4961929321289
19,1564617156982	20,4207305908203
107,5	107,5

Tabela 3.34: Caudais (L/s), Sistema “*Malha 2*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
321,700012207031	321,700042724609
93,8028335571289	92,0368423461914
−44,2190437316894	−44,52241897583
148,197158813476	149,852996826171
44,6781158447265	45,0066528320312
−39,3218803405761	−39,4809646606445

Sistema “Malha 3”.

```

Valores do prototipo que melhor se aproximam, na perspectiva dos consumos nos nos:
dia = 2   hora = 14
  mascara de reservatorios = [ 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 ]
  mascara de amostragem actual = [ 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 ]
Prototipo:  =====
Consumo nos nos = [ 79.70000000000003      98.70000000000003      59.29999999999997
84  88.90000000000006 ];
Rugosidades      = [ 0.2000000000000001      0.2999999999999999      0.2000000000000001
0.6999999999999996      0.2000000000000001      0.2000000000000001      0.2999999999999999
0.2000000000000001 ];
-
Pressoes          = [ -13.450056076049805      -36.443645477294922      -36.202030181884766      -
39.000057220458984      -39.615005493164063      107.5 ];
Caudais           = [ 410.5999755859375      126.96758270263672      -28.344295501708984
203.93240356445312      55.613124847412109      -56.61188885498047      60.674990163574219      -
28.225015640258789 ];
Melhor elemento de modelo: =====
Consumo nos nos = [ 80.344246927349474      97.602387423802824      64.422959111213714
83.221037554698356      85.009368982935712 ];
Rugosidades      = [ 0.18532400622937101      0.80447720134553946      0.85386316206671431
0.85247901339356902      1.5677962992427501      1.2532519359788807      1.9281784895144602
2.0583427740314773 ];
-
Pressoes          = [ -11.397814750671387      -40.646336151123047      -40.318641662597656      -
44.821331024169922      -45.858585357666016      107.5 ];
Caudais           = [ 410.60000610351562      125.72179412841797      -28.376319885253906
204.63395080566406      53.926773071289062      -56.4957275390625      57.807899475097656      -
27.201467514038086 ];

-----
Geraçao_C = 229      Analise relativa ao momento 2 : 0 : 0 (d:h:m).
Geraçao_R = 48      Tempo total de algoritmo = 1 : 39 : 23.17 (h:m:s).
Distancia aparente da "melhor" conjugação de consumo nos nos e rugosidades( type = 2 ):
  "Menor" erro aparente (persp. do consumo nos nos) = 125.72185931074728
    contribuição das pressoes (ver dim.) = 111.68190728144782
    contribuição dos caudais (ver dim.) = 14.039952029299457
-
  "Menor" erro aparente (persp. media da rug.) = 139.16004394627723
    contribuição das pressoes (ver dim.) = 15.040677465746826
    contribuição dos caudais (ver dim.) = 124.11936649053041
-
  Distancia real do "melhor" elemento ao prot. = 55.821378115761114
    contribuição dos consumos nos nos (ver dim.) = 43.608309728126144
    contribuição das rugosidades (ver dim.) = 12.213068387634969

-----

O PROGRAMA CORREU DURANTE 1 : 39 : 26.17 (h:m:s).
Foram integrados 48 ciclos de analise historica.
As gerações de consumo nos nos foram 2304.
As gerações de rugosidade foram 48;
>>

```

Figura 3.47: Resultado da consola de cálculo – Sistema “Malha 3”.

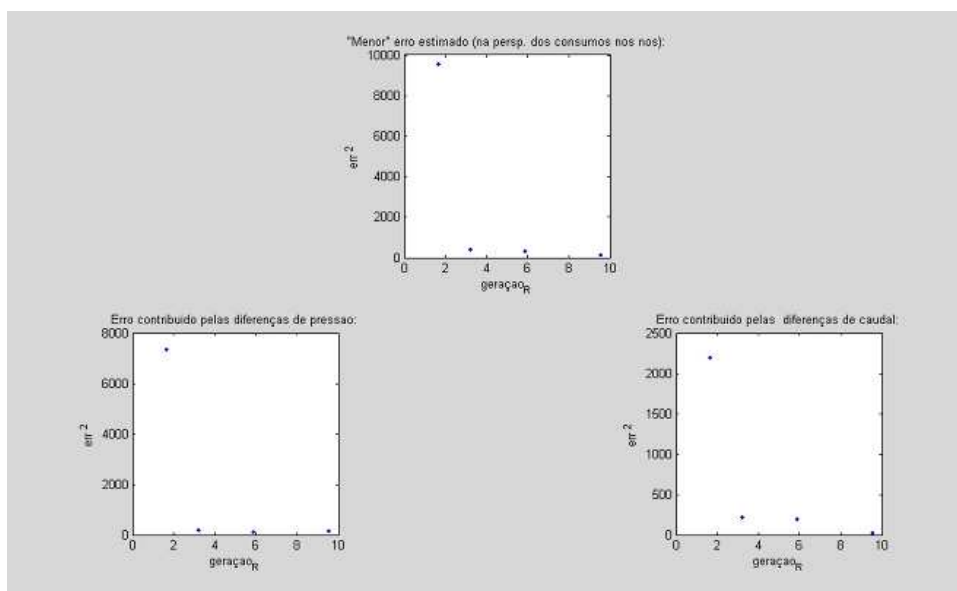


Figura 3.48: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “*Malha 3*”).

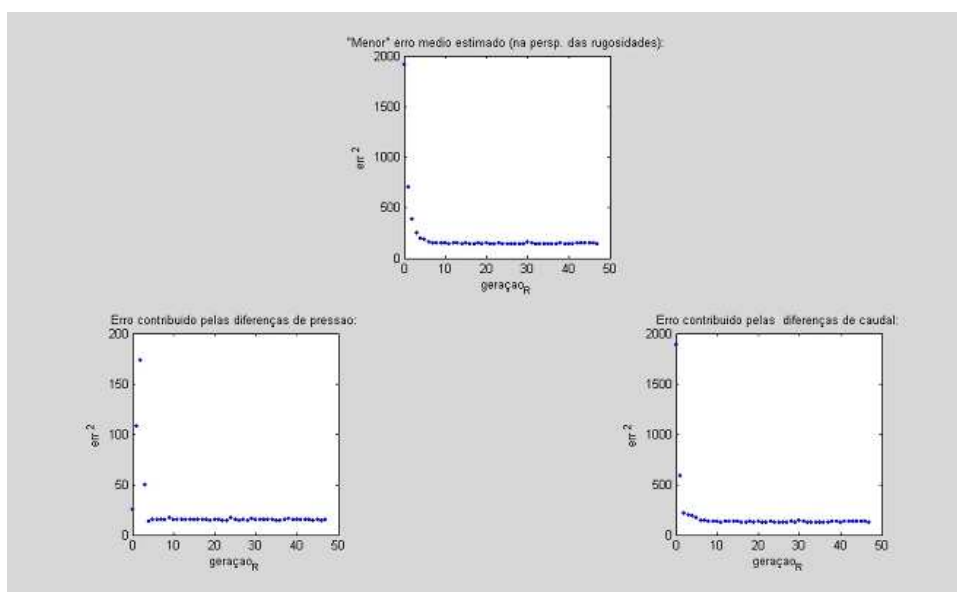


Figura 3.49: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “*Malha 3*”).

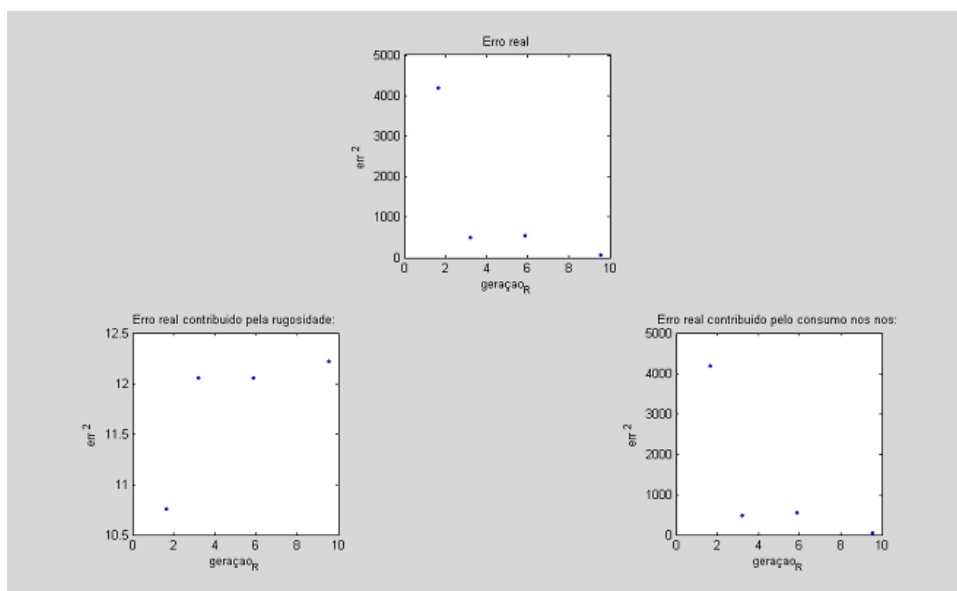


Figura 3.50: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva *real* (Sistema “Malha 3”).

Tabela 3.35: Consumo nos nós (L/s), Sistema “Malha 3”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
79,7	80,3442469273494
98,7	97,6023874238028
59,29999999999999	64,4229591112137
84	83,2210375546983
88,9	85,0093689829357

Tabela 3.36: Rugosidades (mm), Sistema “Malha 3”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
0,2	0,185324006229371
0,2999999999999999	0,804477201345539
0,2	0,853863162066714
0,6999999999999999	0,852479013393569
0,2	1,56779629924275
0,2	1,25325193597888
0,2999999999999999	1,92817848951446
0,2	2,05834277403147

Tabela 3.37: Pressões (mca), Sistema “*Malha 3*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
−13,4500560760498	−11,3978147506713
−36,4436454772949	−40,645336151123
−36,2020301818847	−40,3186416625976
−39,0000572204589	−44,8213310241699
−39,615005493164	−45,858585357666
107,5	107,5

Tabela 3.38: Caudais (L/s), Sistema “*Malha 3*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
410,599975585937	410,600006103515
126,967582702636	125,721794128417
−28,3442955017089	−28,3763198852539
203,932403564453	204,533950805664
55,6131248474121	53,926773071289
−56,611888885498	−56,4957275390625
60,6749801635742	57,8078994750976
−28,2250156402587	−27,201467514038

Sistema “Malha 4”.

```

Valores do prototipo que melhor se aproximam, na perspectiva dos consumos nos nos:
dia = 1 hora = 17
mascara de reservatorios = [ 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 ]
mascara de amostragem actual = [ 1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 ]
Prototipo: =====
Consumo nos nos = [ 79.70000000000003      98.70000000000003      59.29999999999997
84      88.90000000000006      57.20000000000003 ];
Rugosidades = [ 0.2000000000000001      0.2999999999999999      0.2000000000000001
0.6999999999999996      0.2000000000000001      0.2000000000000001      0.2999999999999999
0.2000000000000001      0.9000000000000002      0.2000000000000001 ];
-
Pressoes = [ -49.277587890625      -65.589920043945313      -65.303787231445313      -
66.827194213867188      -66.810111999511719      -62.304882049560547      107.5 ];
Caudais = [ 467.79998779296875      106.79116058349609      -30.958589553833008
171.03767395019531      40.746402740478516      -39.049751281738281      40.032676696777344
4.2038369178771973      110.27115631103516      53.071159362792969 ];
Melhor elemento de modelo: =====
Consumo nos nos = [ 76.522201106878299      98.707222657819467      63.577967199473989
76.511248795710571      93.809605292854371      58.671754947263359 ];
Rugosidades = [ 0.15704391415204214      1.0650521455257858      0.36800512493735531
1.8709326487886575      2.115315769702744      1.3805868089173772      0.35218365349716507
2.3527679362060225      2.4083561733024852      0.4949533956894862 ];
-
Pressoes = [ -41.057933807373047      -63.403427124023437      -63.107334136962891      -
65.164436340332031      -65.1214699609375      -59.506965637207031      107.5 ];
Caudais = [ 467.80001831054687      105.40266418467031      -29.852842330932617
173.64651489257812      34.651203155517578      -36.548286437988281      45.564502716064453
5.3117542266845703      112.22861480712891      53.556861877441406 ];

-----
Geraçao_C = 2224      Análise relativa ao momento 2 : 0 : 0 (d:h:m).
Geraçao_R = 48      Tempo total de algoritmo = 1 : 49 : 57.77 (h:m:s).
Distancia aparente da "melhor" conjugação de consumo nos nos e rugosidades( type = 2):
    "Menor" erro aparente (persp. do consumo nos nos) = 179.874081584225
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 90.612516437351587
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 89.261565146873409
-
    "Menor" erro aparente (persp. media da rug.) = 193.78575124507466
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 91.466292091559808
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 102.31945915351484
-
    Distancia real do "melhor" elemento ao prot. = 124.79003100120711
        contribuição dos consumos nos nos (ver dim.) = 110.75114268785097
        contribuição das rugosidades (ver dim.) = 14.038888313356141

-----

O PROGRAMA CORREU DURANTE 1 : 50 : 1.36 (h:m:s).
Foram integrados 48 ciclos de análise histórica.
As gerações de consumo nos nos foram 2304.
As gerações de rugosidade foram 48;
>>

```

Figura 3.51: Resultado da consola de cálculo – Sistema “Malha 4”.

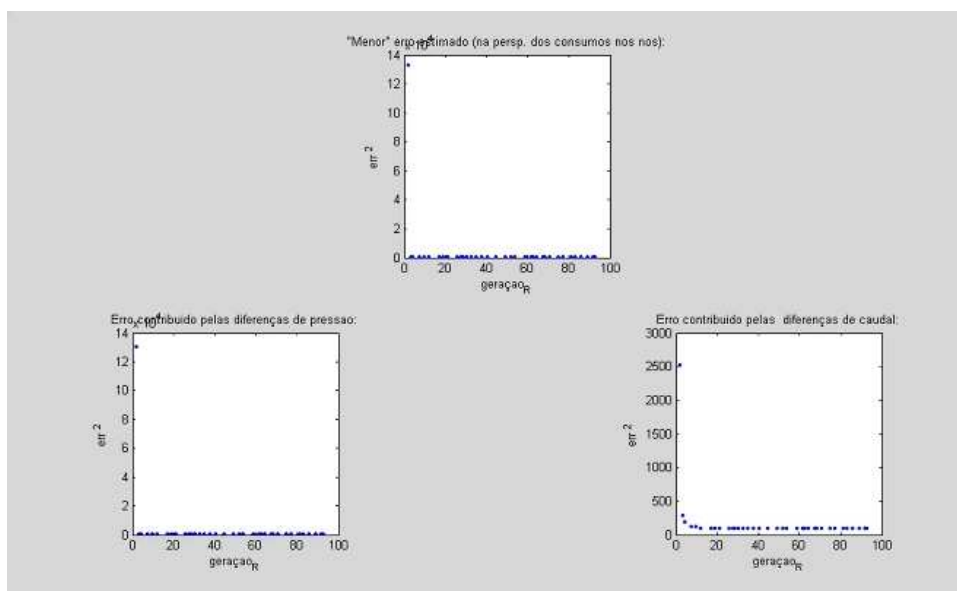


Figura 3.52: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “*Malha 4*”).

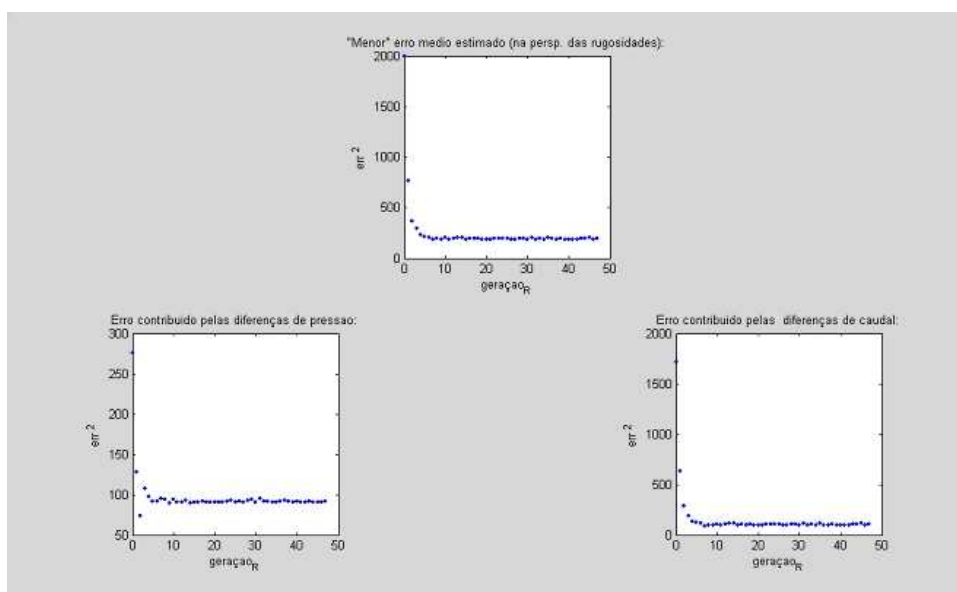


Figura 3.53: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “*Malha 4*”).

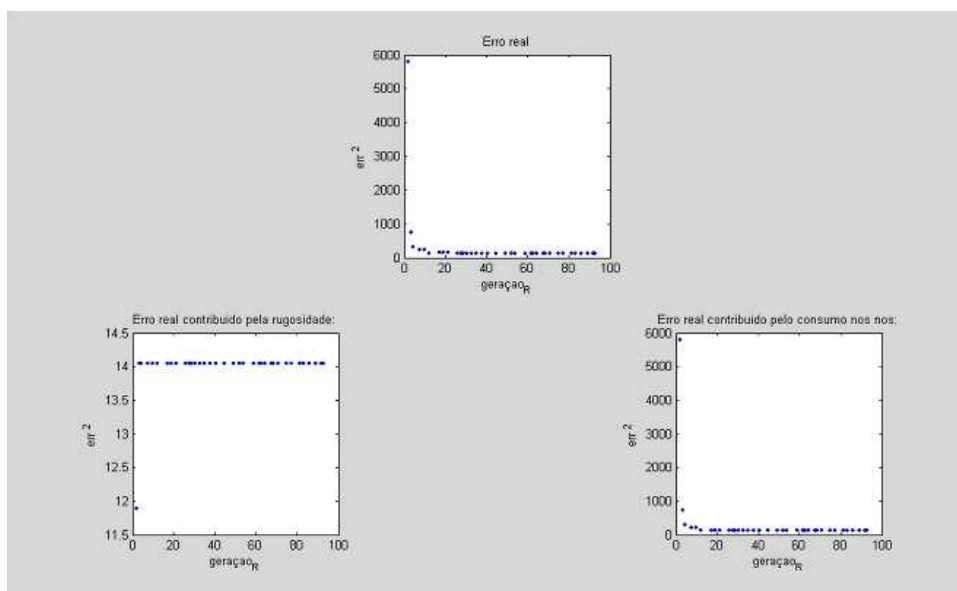


Figura 3.54: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva *real* (Sistema “Malha 4”).

Tabela 3.39: Consumo nos nós (L/s), Sistema “Malha 4”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
79, 7	76, 5222011068782
98, 7	98, 7072226578194
59, 299999999999999	63, 5779671994739
84	76, 5112487957105
88, 9	93, 8096052928543
57, 2	58, 6717549472633

Tabela 3.40: Rugosidades (mm), Sistema “Malha 4”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
0, 2	0, 157043914152042
0, 299999999999999	1, 06505214552578
0, 2	0, 358005124937355
0, 699999999999999	1, 87093264878865
0, 2	2, 11531576970274
0, 2	1, 38058680891737
0, 299999999999999	0, 352183653497165
0, 2	2, 35276793620602
0, 9	2, 40835617330248
0, 2	0, 484953395689486

Tabela 3.41: Pressões (mca), Sistema “*Malha 4*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
−49,277587890625	−41,057933807373
−65,5899200439453	−63,4034271240234
−65,3037872314453	−63,1073341369628
−66,8271942138671	−65,164436340332
−66,8101119995117	−65,1214599609375
−62,3048820495605	−59,506965637207
107,5	107,5

Tabela 3.42: Caudais (L/s), Sistema “*Malha 4*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
467,799987792968	467,800018310546
106,791160583496	105,40266418457
−30,958589553833	−29,8528423309326
171,037673950195	173,646514892578
40,7464027404785	34,6512031555175
−39,0497512817382	−36,5482864379882
40,0326766967773	45,5645027160644
4,20383691787719	5,31175422668457
110,271156311035	112,228614807128
53,0711593627929	53,5568618774414

Sistema “Malha 5”.

```

Valores do prototipo que melhor se aproximam, na perspectiva dos consumos nos nos:
dia = 1   hora = 12
mascara de reservatorios = [ 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ]
mascara de amostragem actual = [ 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ]

Prototipo:
Consumo nos nos = [ 79.70000000000003      98.70000000000003      59.29999999999997
84      88.90000000000006      57.20000000000003      91.29999999999997 ];
Rugosidades      = [ 0.2000000000000001      0.2999999999999999      0.2000000000000001
0.6999999999999996      0.2000000000000001      0.2000000000000001      0.2999999999999999
0.2000000000000001      0.9000000000000002      0.2000000000000001      0.2999999999999999
0.2000000000000001 ];
-
Pressoes          = [ -116.07275390625      -138.82786560058594      -138.58404541015625      -
141.33772277832031      -141.91201782226562      -140.21348571777344      -142.23762512207031
107.5 ];
Caudais           = [ 559.0999755859375      126.30244445800781      -28.482814788818359
202.84696960449219      55.160980224609375      -56.085258483886719      59.903175354003906      -
27.246244430541992      150.25057983398437      32.176185607910156      60.874401092529297      -
30.42559814463125 ];
Melhor elemento de modelo:
Consumo nos nos = [ 94.21723856132121      87.794497770821607      60.409897600305675
81.102319775057993      86.726227637171988      56.940952714765892      91.908865940555458 ];
Rugosidades      = [ 0.18889928589234489      1.571875606307491      1.5858063642819298
1.8963184452280193      1.8581781488044824      1.0568417126488558      1.1739546375647156
0.8817582827875519      2.2681446840273951      2.4050199272323685      1.3651186331526965
0.060809703273821271 ];
-
Pressoes          = [ -113.18662261962891      -143.22895812988281      -142.82841491699219      -
147.04457092285156      -147.76838684082031      -144.95188903808594      -148.04130554199219
107.5 ];
Caudais           = [ 559.0999755859375      115.0787353515625      -28.861900329589844
200.95280456542969      50.761821746826172      -56.146141052246094      60.919181823730469      -
25.806641174316406      148.85121154785156      29.848409652709961      62.061855316162109      -
29.847015380859375 ];

-----
Geraçao_C = 2219      Analise relativa ao momento 2 : 0 : 0 (d:h:m):
Geraçao_R = 48      Tempo total de algoritmo = 2 : 8 : 15.78 (h:m:s).
Distancia aparente da "melhor" conjugação de consumo nos nos e rugosidades( type = 2 ):
    "Menor" erro aparente (persp. do consumo nos nos) = 330.00308811653667
    contribuição das pressoes (ver dim.) = 168.71438803436467
    contribuição dos caudais (ver dim.) = 161.288700082172
-
    "Menor" erro aparente (persp. media da rug.) = 354.93118241638911
    contribuição das pressoes (ver dim.) = 165.46212323627979
    contribuição dos caudais (ver dim.) = 189.47905918010929
-
    Distancia real do "melhor" elemento ao prot. = 362.04126304220659
    contribuição dos consumos nos nos (ver dim.) = 344.4717272010617
    contribuição das rugosidades (ver dim.) = 17.569535841144877

-----

O PROGRAMA CORREU DURANTE 2 : 8 : 19.89 (h:m:s).
Foram integrados 48 ciclos de analise historica.
As gerações de consumo nos nos foram 2304.
As gerações de rugosidade foram 48;
>>

```

Figura 3.55: Resultado da consola de cálculo – Sistema “Malha 5”.

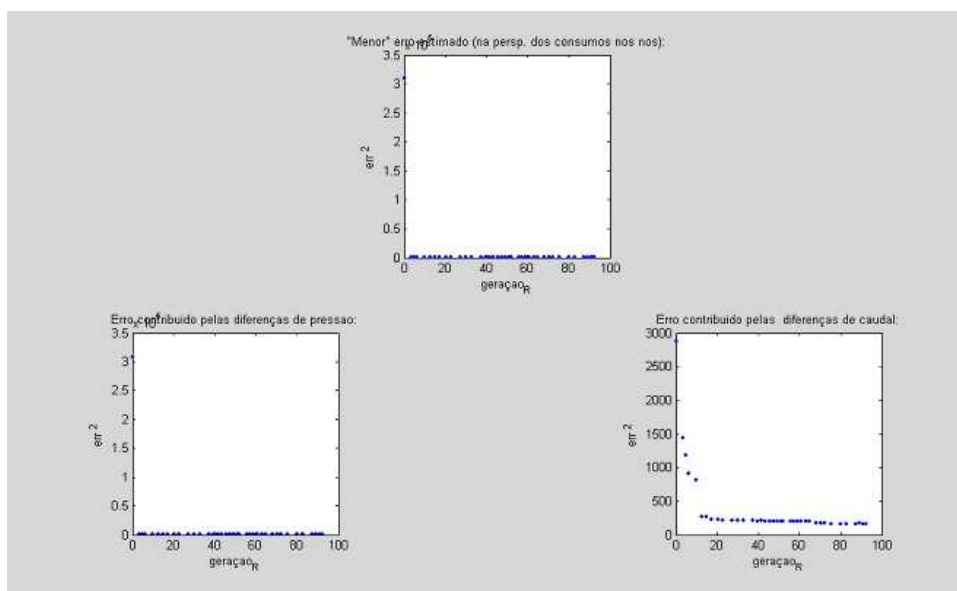


Figura 3.56: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “Malha 5”).

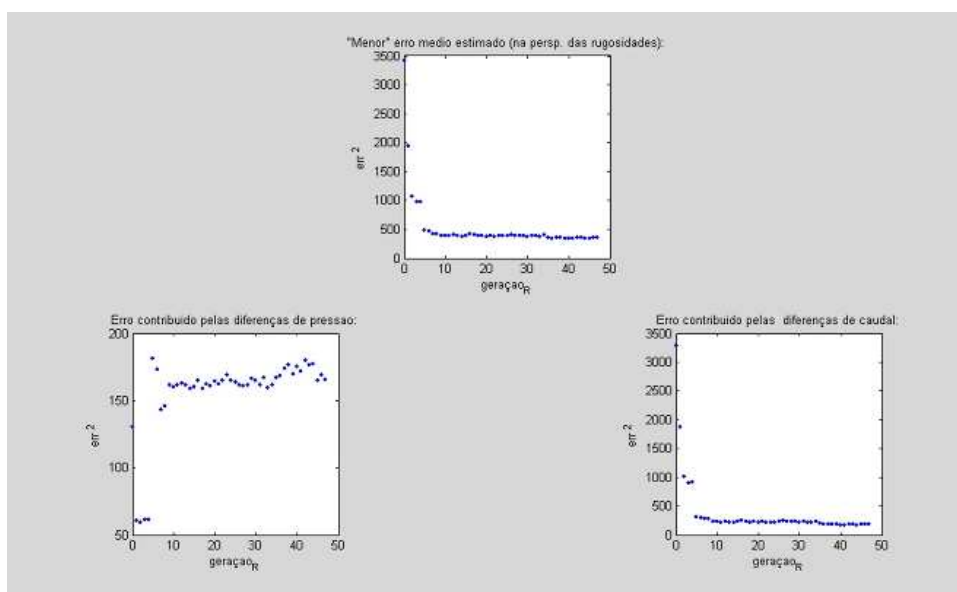


Figura 3.57: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “Malha 5”).

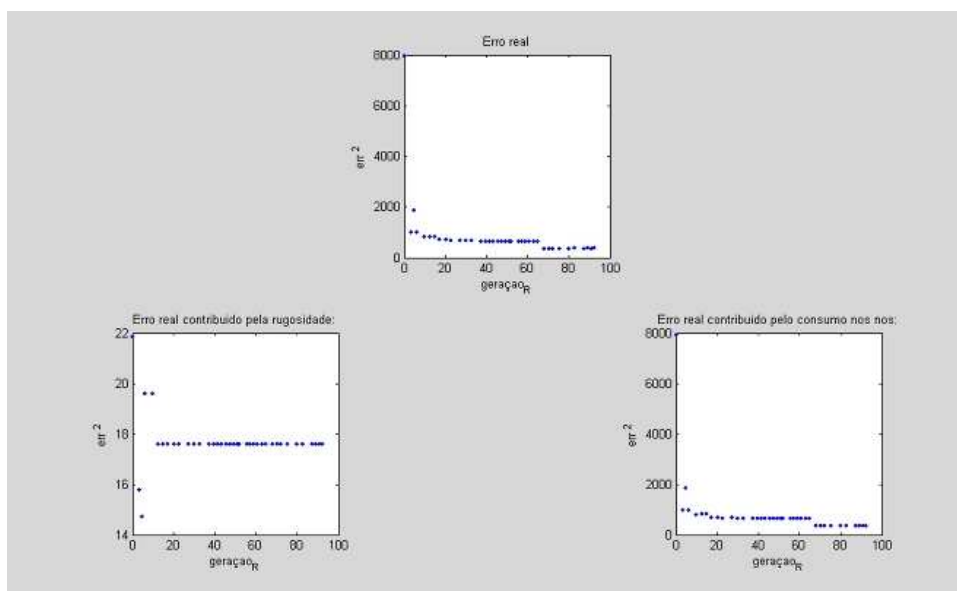


Figura 3.58: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva *real* (Sistema “Malha 5”).

Tabela 3.43: Consumo nos nós (L/s), Sistema “Malha 5”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
79,7	94,2172385613212
98,7	87,7944977708216
59,29999999999999	60,4098976003058
84	81,1023197750579
88,9	86,7262276371719
57,2	56,9409527147658
91,29999999999999	91,9088659405554

Tabela 3.44: Rugosidades (mm), Sistema “Malha 5”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
0,2	0,188899285892344
0,2999999999999999	1,57187560630749
0,2	1,58580636428192
0,6999999999999999	1,89631844522801
0,2	1,85817814880448
0,2	1,05684171264885
0,2999999999999999	1,17395463756471
0,2	0,881758282787555
0,9	2,26814468402739
0,2	2,40501992723236
0,2999999999999999	1,36511863315269
0,2	0,0608097032738212

Tabela 3.45: Pressões (mca), Sistema “*Malha 5*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
−116,07275390625	−113,186622619628
−138,827865600585	−143,228958129882
−138,584045410156	−142,828414916992
−141,33772277832	−147,044570922851
−141,912017822265	−147,76838684082
−140,213485717773	−144,951889038085
−142,23762512207	−148,041305541992
107,5	107,5

Tabela 3.46: Caudais (L/s), Sistema “*Malha 5*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
559,099975585937	559,099975585937
126,302444458007	115,078735351562
−28,4828147888183	−28,8619003295898
202,846969604492	200,952804565429
55,1609802246093	50,7618217468261
−56,0852584838867	−56,146141052246
59,9031753540039	60,9191818237304
−27,2462444305419	−25,8056411743164
150,250579833984	148,851211547851
32,1761856079101	29,8484096527099
60,8744010925292	62,0618553161621
−30,4255981445312	−29,8470153808593

Sistema “Malha 6”.

```

Valores do prototipo que melhor se aproximam, na perspectiva dos consumos nos nos:
dia = 1 hora = 7
mascara de reservatorios = [ 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ]
mascara de amostragem actual = [ 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ]
Prototipo:
Consumo nos nos = [ 79.70000000000003      98.70000000000003      59.29999999999997
84      88.90000000000006      57.20000000000003      91.29999999999997      100 ];
Rugosidades = [ 0.2000000000000001      0.2999999999999999      0.2000000000000001
0.6999999999999996      0.2000000000000001      0.2000000000000001      0.2999999999999999
0.2000000000000001      0.9000000000000002      0.2000000000000001      0.2999999999999999
0.2000000000000001      1      0.6999999999999996 ];
-
Pressoes = [ -202.7894287109375      -222.46304321289062      -222.19258117675781      -
224.36959838867187      -224.52256774902344      -223.09278869628906      -224.53070068359375      -
211.756103515625      107.5 ];
Caudais = [ 659.10003662109375      117.37197875976562      -30.063381195068359
188.27047729492187      48.921291351318359      -48.735359191894531      49.985794067382812      -
13.656652450561523      137.75965881347656      29.439804077148438      51.119850158691406      -
4.1822495460510254      135.99790954589844      35.997901916503906 ];
Melhor elemento de modelo:
Consumo nos nos = [ 62.4418126682855      97.730460265553387      62.343294714494206
80.234675463242919      90.113213668719681      68.412282391705489      92.426380342300348
105.39799049569847 ];
Rugosidades = [ 0.17454405232671213      0.4438137469038666      0.65404386998012154
0.7915273560646694      0.47574362656117697      0.35846085384350929      0.17518725886246253
0.25751468789223947      0.41521846975222464      2.2022407062318474      1.7122118475181218
1.7406012516850968      1.7004869088521062      1.2309470696404614 ];
-
Pressoes = [ -193.3333740234375      -214.20645141601562      -213.88688659667969      -
216.17205810546875      -216.28837585449219      -213.64697265625      -216.30162048339844      -
204.10324096679687      107.5 ];
Caudais = [ 659.10003662109375      115.12159729003906      -29.015485763549805
190.54840087890625      45.412296295166016      -46.406623840332031      53.777317047119141      -
11.5843505859375      153.30955505371094      29.335475921630859      55.661782836914063      -
4.6839443206787109      137.67863464355459      32.280651092529297 ];

-----
Geraçao_C = 2262      Análise relativa ao momento 2 : 0 : 0 (d:h:m).
Geraçao_R = 48      Tempo total de algoritmo = 2 : 37 : 15.98 (h:m:s).
Distancia aparente da "melhor" conjugação de consumo nos nos e rugosidades( type = 2):
    "Menor" erro aparente (persp. do consumo nos nos) = 903.18437666923296
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 577.08193045621738
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 326.10244621301558
-
    "Menor" erro aparente (persp. media da rug.) = 941.08077429276807
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 573.26800618823233
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 367.81276810453573
-
    Distancia real do "melhor" elemento ao prot. = 489.55957582301232
        contribuição dos consumos nos nos (ver dim.) = 479.81931957504958
        contribuição das rugosidades (ver dim.) = 9.740256247962737

-----

O PROGRAMA CORREU DURANTE 2 : 37 : 20.78 (h:m:s).
Foram integrados 48 ciclos de análise historica.
As gerações de consumo nos nos foram 2304.
As gerações de rugosidade foram 48;
>>

```

Figura 3.59: Resultado da consola de cálculo – Sistema “Malha 6”.

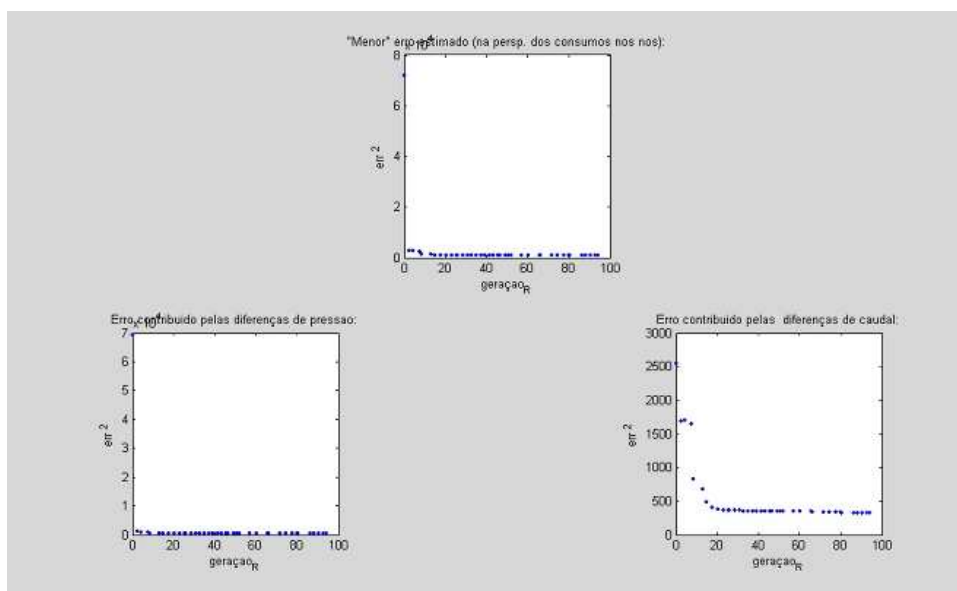


Figura 3.60: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “Malha 6”).

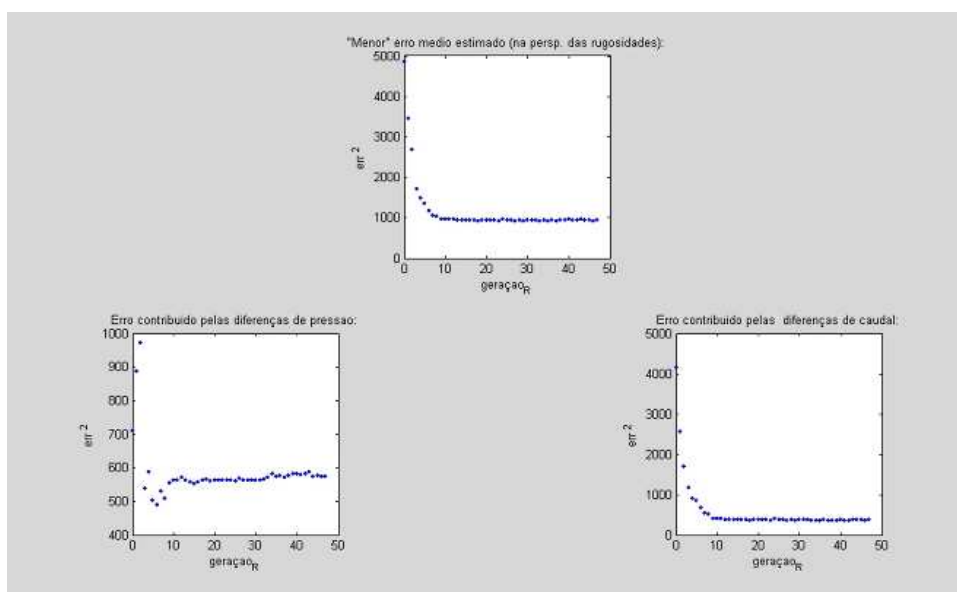


Figura 3.61: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “Malha 6”).

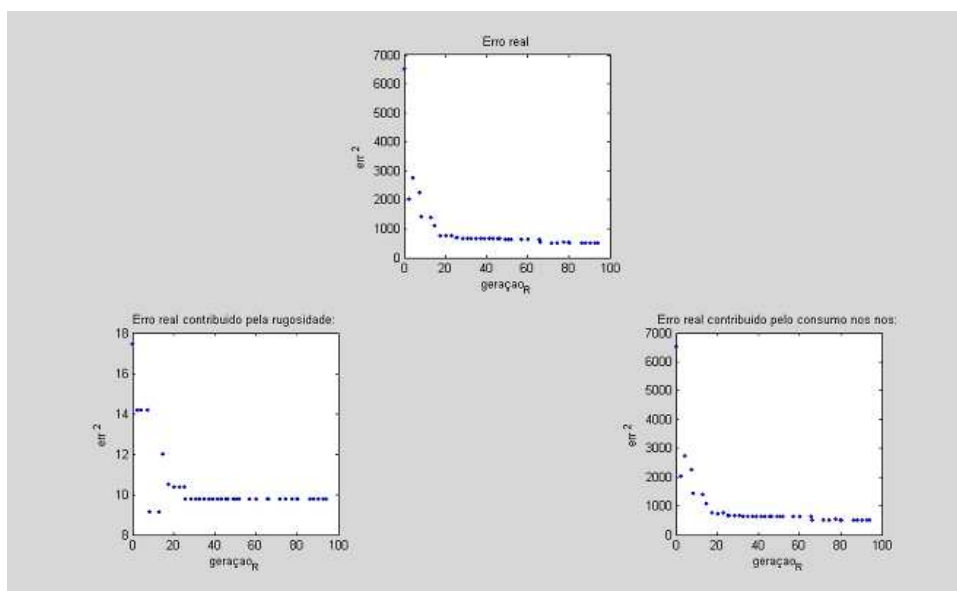


Figura 3.62: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva *real* (Sistema “Malha 6”).

Tabela 3.47: Consumo nos nós (L/s), Sistema “Malha 6”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
79, 7	62, 4418126582855
98, 7	97, 7304502655533
59, 2999999999999	62, 3432947144942
84	80, 2345754632429
88, 9	90, 1132136687196
57, 2	68, 4122823917054
91, 2999999999999	92, 4263803423003
100	105, 397990495698

Tabela 3.48: Rugosidades (mm), Sistema “Malha 6”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
0, 2	0, 174544052326712
0, 2999999999999	0, 443813746903866
0, 2	0, 654043869980121
0, 6999999999999	0, 791527356064669
0, 2	0, 475743626561176
0, 2	0, 358460853843509
0, 2999999999999	0, 175187258862462
0, 2	0, 257514687892239
0, 9	0, 415218459752224
0, 2	2, 20224070623184
0, 2999999999999	1, 71221184751812
0, 2	1, 74060125168509
1	1, 7004869088521
0, 6999999999999	1, 23094706964046

Tabela 3.49: Pressões (mca), Sistema “*Malha 6*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
−202,789428710937	−193,333374023437
−222,46304321289	−214,206451416015
−222,192581176757	−213,886886596679
−224,369598388671	−216,172058105468
−224,522567749023	−216,288375854492
−223,092788696289	−213,64697265625
−224,530700683593	−216,301620483398
−211,756103515625	−204,103240966796
107,5	107,5

Tabela 3.50: Caudais (L/s), Sistema “*Malha 6*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
659,100036621093	659,100036621093
117,371978759765	115,121597290039
−30,0633811950683	−29,0154857635498
188,270477294921	190,548400878906
48,9212913513183	45,412296295166
−48,7353591918945	−46,406623840332
49,9857940673828	53,7773170471191
−13,6566524505615	−11,5843505859375
137,759658813476	153,30955505371
29,4398040771484	29,3354759216308
51,1198501586914	55,561782836914
−4,18224954605102	−4,58394432067871
135,997909545898	137,678634643554
35,9979019165039	32,2806510925292

Sistema “REDE” (Ormsbee, L. E., Wood, D. J., 1986, [171]).

```

Valores do prototipo que melhor se aproximam, na perspectiva dos consumos nos nos:
dia = 2   hora = 10
mascara de reservatorios = [ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 ]
mascara de amostragem actual = [ 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 ]
Prototipo:
Consumo nos nos = [ 79.700000000000003      98.700000000000003      59.299999999999997
84      88.900000000000006      57.200000000000003      91.299999999999997      100
63.899999999999999      73.799999999999997      81.900000000000006      57.799999999999997
61.200000000000003      81.700000000000003 ];
Rugosidades = [ 0.20000000000000001      0.29999999999999999      0.20000000000000001
0.69999999999999996      0.20000000000000001      0.20000000000000001      0.29999999999999999
0.20000000000000001      0.90000000000000002      0.20000000000000001      0.29999999999999999
0.20000000000000001      1      0.69999999999999996      0.29999999999999999
0.20000000000000001      0.29999999999999999      0.20000000000000001      0.5
0.20000000000000001      0.29999999999999999      0.20000000000000001 ];
Pressoes = [ 59.5626220703125      59.578811645607812      58.265228271484375
55.633243560791016      59.337799072265625      70.670082092285156      58.346057891845703
54.511605834960938      54.854282379150391      55.174125671386719      47.205665588378906
31.997499465942383      70.10055419921875      104.79693603515625      104.9999237060547
104.9999237060547      104.9999237060547      104.9999237060547 ];
Caudais = [ -3.9062397480010986      42.379474639892578      109.73715972900391
9.7371616363525391      -28.84788703918467      70.468406677246094      15.042057037353516
124.83383941650391      107.24297332763672      60.975902557373047      76.518035888671875
60.575069427490234      -25.314950942993164      28.37898063659668      57.800003051757813
161.30422973632812      211.4166259765625      433.92083740234375      515.62091064463125
289.27882495117187      163.18130463164063      111.32102203369141 ];
Melhor elemento de modelo:
Consumo nos nos = [ 84.4927151699262      101.26158685731186      58.017282015904506
81.3729981316534      81.262083318360341      78.542781356703713      82.909219305326289
95.768376922378778      79.08995911139441      72.450873882484714      70.131468561620638
55.141506927115323      46.16361509492436      92.765636545150642 ];
Rugosidades = [ 1.5176497978507915      0.49485188880980302      1.4039065988680139
2.4035094865196922      2.4432974445591982      0.29248975309690189      1.4344744885495815
0.043696598425761313      0.40539667827756282      2.0944349530057775      1.3959403947798721
1.0705540698446015      0.29987276168150623      2.2898743385791263      1.2495247993071622
0.32767812235577276      0.4228702501843703      0.24830415602661832      0.50811697783637477
0.23510824768106384      0.22435323157074449      0.37763367104197021 ];
Pressoes = [ 59.743236541748047      59.837116241455078      58.392898559570313
55.163903100585938      59.588752746582031      67.152214050292969      58.114139556884766
52.988357543945312      52.848014831542969      53.190074920654297      46.325008392333984
25.547117233276367      71.225898742675781      104.80098724385234      104.9999237060547
104.9999237060547      104.9999237060547      104.9999237060547 ];
Caudais = [ -8.4538717269997461      44.283687591552734      108.87156677246094
13.103182792663574      -35.887359619140625      72.976577758789063      10.27282461547852
117.15550231933694      102.32833099366234      46.135302947998047      78.18798828125
58.768875122070313      -30.09941291809082      21.774007797241211      55.141506195068359
159.28829956054687      211.17253112792969      416.62445068359375      509.39007568359375
298.02664184570313      168.48432922363281      103.46897003173828 ];

Geraçao_C = 2241      Análise relativa ao momento 2 : 0 : 0 (d:h:m).
Geraçao_R = 48      Tempo total de algoritmo = 3 : 24 : 20.65 (h:m:s).
Distancia aparente da "melhor" conjugação de consumo nos nos e rugosidades( type = 2 ):
    "Menor" erro aparente (persp. do consumo nos nos) = 877.25992058188422
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 68.138029215086135
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 809.12189136679808
    "Menor" erro aparente (persp. media da rug.) = 985.24639538325141
        contribuição das pressoes (ver dim.) = 69.726419531589954
        contribuição dos caudais (ver dim.) = 915.51997585166146
    Distancia real do "melhor" elemento ao prot. = 1388.7095784629801
        contribuição dos consumos nos nos (ver dim.) = 1366.4474250539622
        contribuição das rugosidades (ver dim.) = 22.26215340901782

O PROGRAMA CORREU DURANTE 3 : 24 : 28.09 (h:m:s).
Foram integrados 48 ciclos de análise historica.
As gerações de consumo nos nos foram 2304.
As gerações de rugosidade foram 48;
>>

```

Figura 3.63: Resultado da consola de cálculo – Sistema “REDE”.

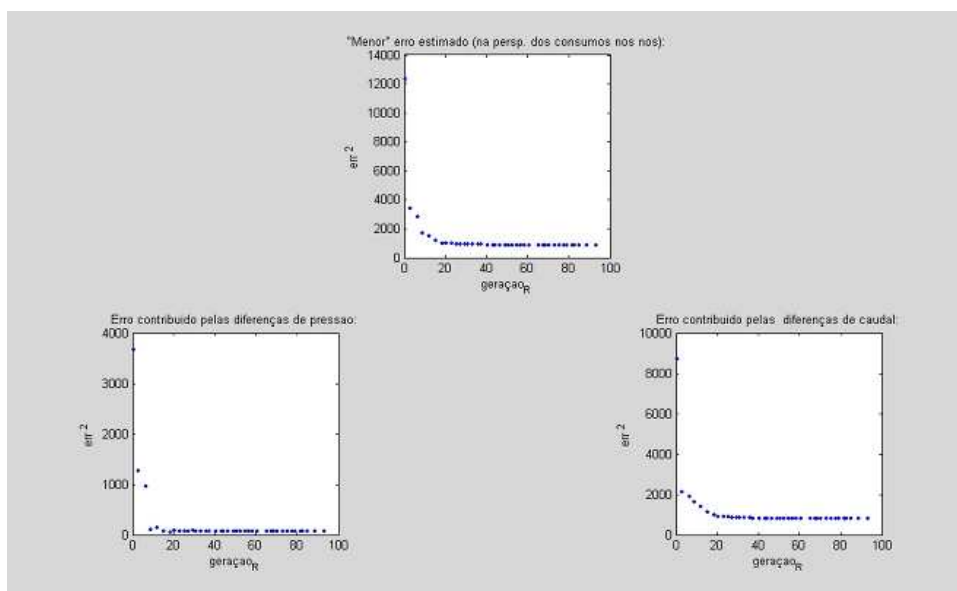


Figura 3.64: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva dos consumos nos nós (Sistema “REDE”).

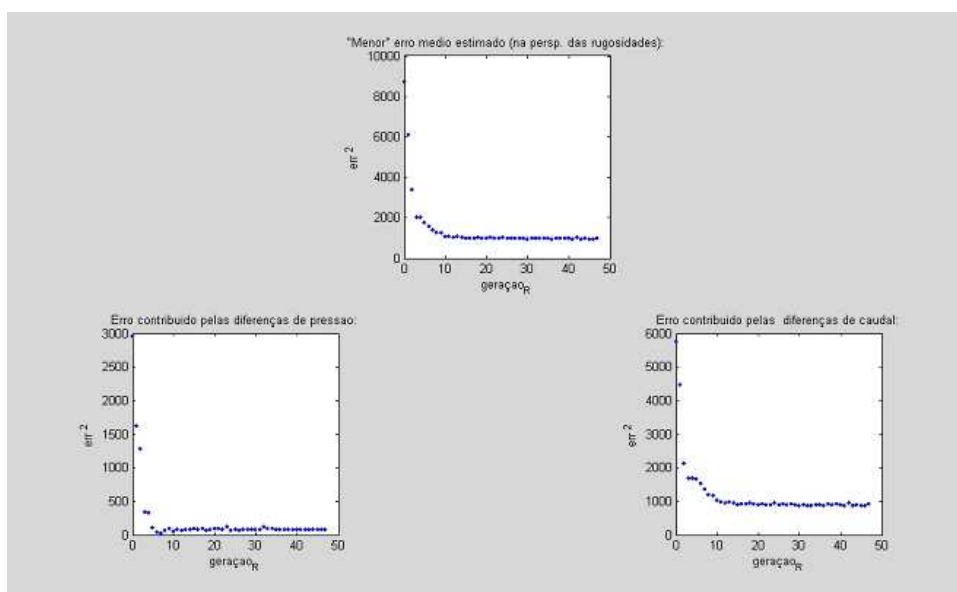


Figura 3.65: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva das rugosidades (Sistema “REDE”).

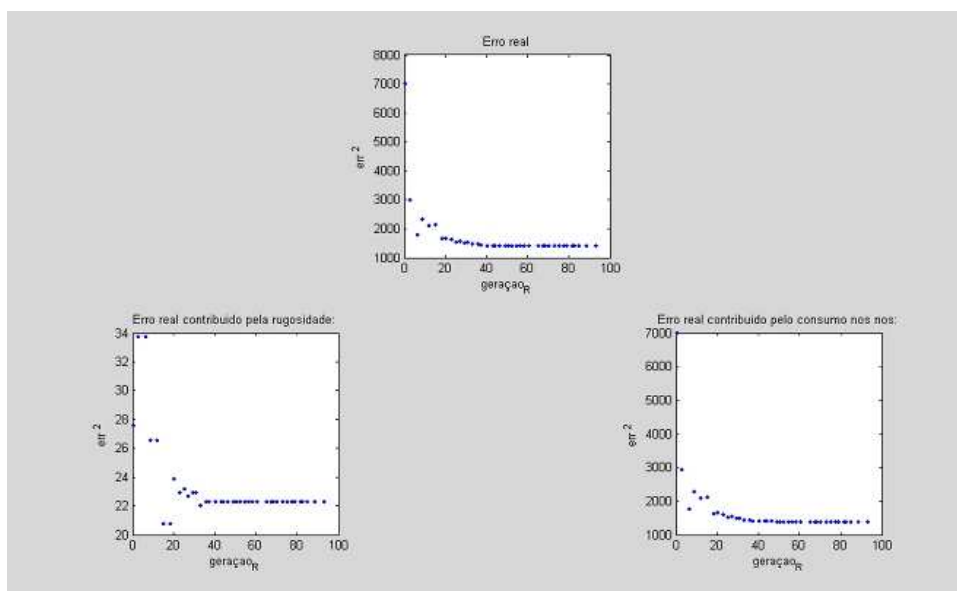


Figura 3.66: Gráfico da evolução das objectividades, na perspectiva *real* (Sistema “REDE”).

Tabela 3.51: Consumo nos nós (L/s), Sistema “REDE”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
79,7	84,4927151699262
98,7	101,261586857311
59,29999999999999	58,0172820159045
84	81,3728981316534
88,9	81,2920833183603
57,2	78,5427813567037
91,29999999999999	82,9092193053262
100	95,7683769223787
63,89999999999999	79,0899559111394
73,79999999999999	72,4508738824847
81,9	70,1314685616206
57,79999999999999	55,1415069271153
61,2	46,1636150949243
81,7	92,7656365451506

Tabela 3.52: Rugosidades (mm), Sistema “REDE”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
0, 2	1, 51764979785079
0, 2999999999999999	0, 494851888809803
0, 2	1, 40390659886801
0, 6999999999999999	2, 40350948651969
0, 2	2, 44329744455919
0, 2	0, 292489753096901
0, 2999999999999999	1, 43447448854958
0, 2	0, 0436965684257613
0, 9	0, 405396678277562
0, 2	2, 09443495300577
0, 2999999999999999	1, 39594039477987
0, 2	1, 0705540698445
1	0, 299872761681506
0, 6999999999999999	2, 28987433857912
0, 2999999999999999	1, 24952478930716
0, 2	0, 327678122355772
0, 2999999999999999	0, 42287025018437
0, 2	0, 248304156026618
0, 5	0, 508116977836374
0, 2	0, 235108247681063
0, 2999999999999999	0, 224353231570744
0, 2	0, 37763367104197

Tabela 3.53: Pressões (mca), Sistema “REDE”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
59, 5626220703125	59, 743236541748
59, 5788116455078	59, 837116241455
58, 2652282714843	58, 3928985595703
55, 633243560791	55, 1638031005859
59, 3377990722656	59, 588752746582
70, 6700820922851	67, 1522140502929
58, 3460578918457	58, 1141395568847
54, 9116058349609	52, 9883575439453
54, 8542823791503	52, 8480148315429
55, 1741256713867	53, 1900749206542
47, 2056655883789	46, 3250083923339
31, 9974994659423	25, 5471172332763
70, 1005554199218	71, 2258987426757
104, 796936035156	104, 800987243652
104, 999992370605	104, 999992370605
104, 999992370605	104, 999992370605
104, 999992370605	104, 999992370605
104, 999992370605	104, 999992370605

Tabela 3.54: Caudais (L/s), Sistema “*REDE*”:

Protótipo	Melhor “ <i>modelo</i> ”
−3,90623974800109	−8,45387172698974
42,3794746398925	44,2836875915527
109,737159729003	108,87156677246
9,73716163635253	13,1031827926635
−28,8478870391845	−35,8873596191406
70,468406677246	72,976577758789
15,0420570373535	10,2728824615478
−124,833839416503	−117,155502319335
107,242973327636	102,328330993652
50,975902557373	46,136302947998
76,5180358886718	78,18798828125
−60,5750694274902	−58,7688751220703
−25,3149509429931	−30,0994129180908
28,3789806365966	21,7740077972412
57,8000030517578	55,1415061950683
161,304229736328	159,288299560546
211,416625976562	211,172531127929
433,920837402343	416,624450683593
515,620910644531	509,390075683593
289,276824951171	298,026641845703
163,18130493164	168,484329223632
111,321022033691	103,498970031738

Capítulo 4

Conclusões

4.1 DESCRIÇÃO E COMENTÁRIO DOS ELEMENTOS APRESENTADOS

4.1.1 Introdução

A estrutura do presente trabalho representa um método de calibração por otimização. Mas dado, nesta fase da investigação de comportamento do processo, se utilizar uma máscara de amostragem hidráulica total, que engloba a totalidade de variáveis hidráulicas de pressões nos nós e caudais nas tubagens, a classificação atribuível poderá ser, neste caso, de calibração explícita ou determinística, intermediada por uma abordagem genética tendente à resolução inversa do sistema.

Os gráficos e tabelas de resultados, anteriormente apresentados, evidenciam a evolução dos movimentos de aproximação à solução aparente (a única que em termos realistas se conseguirá avaliar num protótipo para calibração), ao longo do tempo de cálculo.

Os valores calculados para optimização dos consumos nos nós são consistentes com uma aproximação, sensível, do modelo ao protótipo. Os valores calculados para optimização das rugosidades, e apesar do que é referido no ponto anterior, oferecem todavia algumas discrepâncias decorrentes da insensibilidade observada sobre esta variável.

Os elementos numéricos obtidos, mercê das dificuldades e limitações presentes no equacionamento do problema, evidenciam de qualquer modo um razoável ajuste se equacionássemos a presente abordagem em termos de necessidades de calibração, relativamente ao item consumo nos nós de redes reais de distribuição de água, em causa de análise.

A rugosidade evidencia, todavia, algumas dificuldades de convergência, consequência da menor sensibilidade da sua influência no funcionamento do sistema matemático subjacente à análise realizada, questão que se tinha identificado com profusão, abordada por vários autores e em vários trabalhos consultados, elemen-

tos estes que integram a bibliografia relativamente ao desiderato de calibração de sistemas de distribuição de água.

Algumas das circunstâncias descritas decorrem da dificuldade que se encontra presente para o cálculo da objectividade. Que se constitui como uma soma liminar da aproximação respectiva de cada variável de modelo e protótipo realiza. De facto, esta conta realiza-se sobre diferenciais de L/s , para os caudais nas tubagens, com diferenciais de mca , para as pressões nos nós, no caso da objectividade directa da calibração. E soma de diferenciais de L/s , de consumo nos nós, com diferenciais de mm , das rugosidades das tubagens, no caso da objectividade indirecta, ou real, de calibração.

Esta dificuldade poderia ser eventualmente diminuída através de um ajuste da ponderação entre a influência de cada uma das diferentes parcelas presentes na conta de abordagem, que compõem o valor da objectividade. Para ultrapassar esta questão, ainda se tentou adimensionalizar as diferenças de pressões e de caudais. Mas estas abordagens revelaram-se com uma insensibilidade maior, sobre o sistema de busca, que a perspectiva da soma de diferenças dimensionais quadráticas, utilizada para obtenção dos resultados que foram apresentados, utilizando-se, *tout court*, as dimensões relativas às variáveis e suas dimensões utilizadas para expressão do cálculo hidráulico.

Conclui-se, deste modo, como não sendo possível, no âmbito dos presentes trabalhos desenvolvidos, otimizar a abordagem que se estudou, relativamente a estes pormenores de efectivação do cálculo.

As dificuldades de convergência e de insensibilidade da rugosidade, já tinham sido enunciadas nomeadamente por Bhave (1988, a) [23], relativamente a métodos iterativos, constatando-se pelo presente trabalho e outro modo, esta mesma constatação aplicável à abordagem de calibração de redes de abastecimento de água, na formulação proposta.

4.1.2 Descrição dos testes e resumo dos resultados

Os testes à abordagem proposta para calibração decorreram depois de se entender completamente desenvolvida a fase de estruturação da abordagem algébrica e de cálculo utilizada. A fase de estruturação do algoritmo e da concepção da abordagem foi a que, conceptualmente, mais exigência efectuou. Não será porém de desprezar o esforço realizado a par, no sentido da identificação das incorrecções de abordagem e de obtenção e interpretação de resultados.

Os testes decorreram em máscara completa de amostragem, utilizando-se um histórico de dois dias de simulação, pelo facto de ainda não se sentir o sistema suficientemente evoluído e robusto para suportar circunstância de cálculo mais gravosas. Entende-se porém que se poderá adquirir significativamente mais sensibilidade para a actuação que se envolve, se se integrar a contribuição de análises de traços, a

qualidade, bem como de transitórios hidráulicos, como condicionante e avaliação, no desempenho do algoritmo genético aplicado.

Esta perspectiva toma-se dos seguintes factos: i) a introdução de novas variáveis decorrentes da análise de traços e qualidade de água, é menor que o número de novas equações possíveis de gerar com a análise; ii) a facilidade e a flexibilidade da realização concreta de amostragens para os sistemas de traços e qualidade, é maior que para a realização das amostragens hidráulicas directas de funcionamento da rede; iii) a variável relativa a “*wall decay*” (decaimento de parede), da análise de qualidade, possui características que em termos comportamentais a assimilam à rugosidade (Walski, 2003) [248], podendo ser tratada a par desta, aplicando-se também a ela a primeira das hipóteses colocada em tese, isto é da sua constância estrutural no tempo, semelhantemente à rugosidade; iv) a outra variável presente, a “*bulk decay*” (decaimento central do escoamento), relaciona-se directamente com o tempo de percurso da água entre pontos medidos da rede e graus de mistura realizada, o que implica com as velocidades de escoamento e caudais da totalidade do sistema de condutas de distribuição.

Significarão estas circunstâncias, para a análise de qualidade, que uma só medida sincronizada, onde se obtenha diferenças de qualidade entre dois pontos da rede de distribuição, contrariamente às medidas hidráulicas, resulta numa avaliação de coincidência que implica a totalidade do sistema de distribuição.

Este conjunto de circunstâncias indicado torna fundamental, para a presente abordagem de calibração, a integração da análise de traços e de qualidade, para o presente sistema que se desenvolve. Esta possibilidade de abordagem é merecedora de um esforço que integre as suas formas possíveis de contribuição, na presente abordagem desenvolvida para calibração.

Dada a presença de mascara completa de amostragem, não se enfrentarão problemas na dinâmica computacional desta variável na estrutura de cálculo, ao longo da sua realização. Esta questão, se não fosse objecto desta simplificação, implicaria um tempo de funcionamento do sistema que relaxasse da influência da definição aleatória inicial, para a estrutura de amostragem, necessitando-se, nesta outra circunstância, de garantir que os resultados obtidos possuísem uma estabilização, consequência de um amortecimento das necessidades de amostragem, efectuada internamente no sistema de cálculo implementado. E já não por uma influência de definição inicial aleatória.

No geral os resultados obtidos evidenciam uma dificuldade crescente para a determinação de resultados aproximados, à medida que a rede em análise se complexe e apresente com mais malhas. Nomeadamente em relação à variável rugosidade. Esta será a expressão da insensibilidade desta variável relativamente ao funcionamento das redes de distribuição de água. Esta questão manifestar-se-á mais exuberantemente em condutas que disponham de mais baixa velocidade de escoamento e

correspondente perda de carga unitária. Todavia para os exemplos ramificados e para os exemplos com pequeno número de malhas, os resultados oferecem elevado grau de consistência, medido pelo grau de correlação que a comparação entre dados obtidos de modelo e os dados presentes no protótipo evidenciam.

4.1.3 Discussão

A aplicação de um algoritmo genético, compartimentado em fases, da forma desenhada comportou, essencialmente, a explanação da praticabilidade das hipóteses em tese que se encontram subjacentes. Estas hipóteses operacionalizam a intercepção de espaços de soluções obtidas em sucessivos tempos de funcionamento das redes, pretendentemente sob condições diferenciadas de solicitação, mas, na presente abordagem, ainda observadas sob solicitação permanente. A abordagem diferenciada pretende-se que introduza diferenças em relação a uma análise simples, pelo facto de ser decorrente de uma análise extensa no tempo.

Os corolários disponibilizados pela actual metodologia proposta, implicam com uma forma de determinação de critérios de organização e de valor para a obtenção de dados de amostragem dos sistemas de distribuição. Esta disponibilização ordenada de dados, comportando a determinação dos parâmetros de amostragem que, dentro de limitações que se imponham ao sistema, sejam dotados de maior sensibilidade para a convergência do sistema de cálculo, constituir-se-á, ele próprio, como um sistema de determinação da sensibilidade, alternativo à própria definição clássica (Savic, 2002 [206], por exemplo). Introduce-se, deste modo, mais uma possibilidade de análise sobre os sistemas de distribuição de água, que enriquecerá certamente as possibilidades de calibração e/ou determinação dos mesmos.

O se poder alcançar resultados de calibração que impliquem sobre a própria monitorização do sistema, significa poder-se obter o que de mais básico necessitamos de definir previamente para a abordagem desta problemática. A perspectiva de ordenamento temporal de importância, do tipo que ocorre entre o ovo e a galinha, e que também é presente entre a definição da estrutura de obtenção de dados e a qualidade da calibração que se pode obter, é superada através de uma abordagem em período extenso que, dentro das condicionantes que lhe sejam próprias (nomeadamente de pontos de amostragem), e aplicando as hipóteses apresentadas, reduz a singularidade e, no limite, permitirá uma abordagem de determinação algébrica inversa do sistema, intermediada na abordagem que se seleccionou, por um algoritmo genético.

As possibilidades trazidas pela viabilidade observada no presente trabalho, significarão em passo seguinte, que não abrangido porém no presente âmbito, uma possibilidade de abordagem do diagnóstico e da gestão de sistemas, recorrendo-se inclusivamente a mecanismos de inteligência artificial, aplicados sobre redes de distribuição de água. Esta afirmação decorre de se saber ser essencial, para esse fim referido, se dispor de mecanismos objectivos para o ordenamento (quer em termos

de emissão de ordens, quer de ordenação de importância) e que possuam antecedência justificada, na realização espaço-temporal das amostragens, como também no registo automatizado das respectivas observações do sistema de monitorização. Estas questões resolvem-se no presente âmbito de abordagem, apenas se excluindo, por possuir outras condicionantes, os critérios para a emissão de manobras sobre a rede ou para estabelecimento de diagnósticos.

Até ao presente momento, as perspectivas que trespassam da generalidade da bibliografia consultada sobre a presente matéria, é de molde a considerar a amostragem como infra-estrutural, não dinâmica portanto. Não se dispendo de abertura tendo-se em vista se evitar, mesmo sobre períodos extensos de simulação e análise, a singularização da matriz de determinação inversa do sistema.

No presente algoritmo esta matéria é proposto que seja mediada pelo grau de dispersão/variância relativa observada nas populações, contendo-se deste modo uma solução de localização determinística, global e universal, em termos de espaço e de tempo, para a amostragem. E que, para efeitos práticos do ordenamento deste sistema, agrega peso e critério que impregnam mais consistentemente a totalidade do cálculo.

Em termos globais, o sistema comporta-se evoluindo dinamicamente dentro do esperável para um algoritmo do tipo que se utiliza. A evolução observada, e que se ilustra nos gráficos para esse fim concebidos e apresentados, caracteriza-se na forma de uma aproximação, quase assintótica do elemento populacional mais adaptado, à estrutura conhecida de base do protótipo que se utiliza. Evidenciam-se no entanto algumas dificuldades, nomeadamente de complexidade nas redes mais extensas, e de insensibilidade da variável rugosidade, já indicada, questões que fazem em algumas circunstâncias divergir/oscilar a aproximação indicada.

Porém esta asserção não é completamente válida em relação às aproximações que foram designadas por “*reais*”. Isto é, as relativas aos consumos nos nós e às rugosidades, que são de medição/obtenção indirecta num processo real de calibração. Neste outro caso, dado as aproximações a estas variáveis serem sugeridas de forma indirecta, em relação à aproximação dos caudais e das pressões, medidas directamente, implicar-se-ão certamente, nesta área, a necessidade da realização de esforços de desenvolvimento adicionais. Nomeadamente que permitam a operacionalização da análise de traços (Grayman, 1998) [93] sobre a calibração de modelos matemáticos de redes, e integrando esse outro sistema adicional nas perspectivas de abordagem realizadas no presente trabalho. Como também a da integração na análise, com critérios semelhantes aos já indicados para as rugosidades e da designada “*wall decay*”, também para as variáveis do transitório hidráulico aplicado a redes de distribuição de água.

A aproximação do algoritmo foi medida, na perspectiva directa, pela distância dimensional quadrática que caudais nas tubagens (expressa em L/s) e pressões (ex-

pressas em *mca*), ofereçam sobre o protótipo. A possibilidade de realizar no modelo informático a medição directa da rugosidade e do consumo nos nós, parâmetros como já referido medidos de forma indirecta (e também não obteníveis com facilidade num sistema real), reforça o interesse da abordagem simulada de redes para a sua investigação, como realizada no presente trabalho. Se não colocar-mos em causa a validade dos modelos aplicados (e esta seria outra investigação, que não a presente), este caminho constituir-se-á como muito promissor para outros desenvolvimentos de investigação que integrem, como fileira justificadora, a particularização das hipóteses colocadas.

Por fim referencia-se que o relacionamento cruzado das objectividades designadas por “*reais*” (na realidade indirectas do modelo e compostas pelas objectividades dos consumo nos nós e rugosidades) e as objectividades designadas por “*aparentes*” (na realidade directas, em relação às variáveis medidas directamente no processo de calibração, as pressões e os caudais nas tubagens das redes) evidencia uma semelhança de sensibilidade e uma correlação sensível de andamento, ao longo do algoritmo, entre os pares constituídos pelos consumos nos nós e os caudais das tubagens, por um lado, e as pressões nos nós e as rugosidades, por outro.

Não deixa de ser interessante se evidenciar que esta similitude de andamento entre os pares cruzados referidos, incide sobre variáveis que possuem na realidade possibilidades de expressão no mesmo domínio dimensional, isto é, num comprimento, para as rugosidades e pressões (respectivamente expressas em *mm* e *mca*) e, em caudal, para os consumos nos nós e caudais nas tubagens (ambas em *L/s*). Este facto observado pode se constituir numa pista significativa para auxílio e desenvolvimento de um sistema de pesos que se observe mais adequado, tendo em vista equilibrar a contribuição de cada uma das variáveis integradas no computo global das objectividades, possíveis de determinar num sistema real de calibração.

No presente âmbito de discussão, pensa-se relevante se ponderar novamente a abordagem utilizada para demonstração do conjunto de hipóteses colocado em tese. Nomeadamente em relação ao conjunto de redes ramificadas. De facto, e em casos limites onde ocorresse uma extensão exagerada de número de nós e de tubagens, chegar-se-ia, certamente, a solicitações físicas já não representadas validamente pelo modelador utilizado. O que significaria a obtenção de resultados não válidos e colocados completamente fora da realidade. Esta questão não pôde ser verificada no âmbito da presente dissertação.

4.2 PERSPECTIVA E CONCLUSÕES

Conclui-se, da presente dissertação, pela possibilidade de aplicação de algumas abordagens adicionais, tendo em vista a calibração de parâmetros constitutivos dos modelos matemáticos aplicados a sistemas de distribuição de água. Foram explicitadas desde, a hipótese mais fundamental da tese, relativa à constância temporal de definição das rugosidades, bem como as relativas à distribuição dos consumos nos nós.

Acredita-se, porém agora com mais fundamentação que anteriormente, existir margem de constrição, isto é de estabelecimento de novas equações ao fenómeno da distribuição de água, que permitam, em conjunto integrado, uma melhor abordagem global do desiderato de calibração de parâmetros, tendo em vista a melhor gestão técnica e económica dos sistemas de distribuição de água.

De entre os sistemas que convirá efectuar extensão de desenvolvimento, encontra-se a definição de consumos. Que necessita de ser melhor particularizada e correlacionada, com a extensão e tipologia da influência dos consumidores sobre os nós das redes. Certamente questões, de consumo e de influência, induzidas por factores psico/ambientais – como a temperatura e a humidade atmosférica ou a insolação – e a localização geométrica e os caudais.

Também os modelos de qualidade necessitam de ser aproximados e adaptados ao modelo desenvolvido. Para este fim será razoável imaginar-se o parâmetro de decaimento de parede (“*wall decay*”), abordado de forma semelhante ao explicitado para a rugosidade, por Nikuradse, no seu relacionamento com as perdas de carga em condutas. Esta perspectiva, sobre esta variável, permitiria que, somando o decaimento central (“*bulk decay*”), que será constante, característico da água, dependente da temperatura e da concentração, mas independente das condições do escoamento, faria observar o decaimento total presente numa determinada conduta e condição particular de escoamento.

O decaimento central (“*bulk decay*”), e respectivo valor de concentração central, poderá ser uma constante da água e do soluto, eventualmente também função da temperatura e da concentração que se encontre presente. Deste modo a equação que, dentro de um sistema de distribuição de água possa tornar universal esta relação, face à variável temporal, poderia ter de integrar a inércia da variação de temperatura da água, isto é o seu calor específico, a condutividade térmica das superfícies das condutas face à temperatura do escoamento e ambiental, bem como desenvolver-se uma extensão apreciável da análise da qualidade à análise térmica do escoamento. Isto é uma análise que possa responder às variações de estado da temperatura, temporal e pontual, da distribuição. Todavia dada a complexidade deste modo envolvida e pequeno grau de remuneração previsivelmente obtido, pensa-se ser primeiramente necessário um entendimento e um desenvolvimento de investigação realizado sobre um sistema apenas isotérmico.

O modelo teórico testado foi compreendido, na sua formulação inicial, como pretendentemente resoluto e dotado de invasão profunda da problemática que se pretende enfrentar pelo presente trabalho e desenvolvimento. Não fosse a presença de uma aborrecida e particularmente intensa insensibilidade, evidenciada pela variável rugosidade, e não se atrasaria tanto a obtenção de melhores resultados que aqueles que foram obtidos. Porém também se compreende que, se o problema fosse fácil, mais que muitos que os muitos dos autores que se apontam na bibliografia, teriam chegado já a uma resolução clássica, indubitável e completa da problemática, o que não se oferece como caso.

Deste modo, entende-se o presente trabalho desenvolvido como possuidor de interesse, porém não completo, justificando-se, nos desideratos sucessivamente indicados, re-abordagens que permitam a integração de novos condicionamentos, independentes e suplementares dos agora utilizados, que pelo presente trabalho são evidenciados e estabelecidos. Esta linha de investigação crê-se que se constitua como um caminho razoável, a partir do qual se poderá tornar mais fácil uma maior explicitação dos modelos e funcionamento dos protótipos de redes de distribuição de água, que melhor calibração dos respectivos parâmetros presentes ofereça aos utilizadores de modelos e exploradores de sistemas de distribuição de água.

Como conclusão final, indica-se que ficou a consciência do autor tranquila, não só pelas consequências do enorme volume de trabalho e de energia dispendidos na investigação e desenvolvimentos que foi possível de concretizar na *toolbox* de ligação entre a biblioteca externa do *EPANET* e o interpretador de linguagem informática *MATLAB*, como na obtenção de razoáveis resultados de aproximação entre as variáveis medidas para calibração do protótipo e modelo desenvolvidos.

Duas conclusões finais podem também ser formuladas sobre o trabalho realizado. A primeira delas prende-se com a constatação de insensibilidade da variável rugosidade, no funcionamento do modelador. Por um lado, e como limitação do trabalho, não se efectuou uma confirmação desta circunstância sobre redes reais protótipo, apesar desta constatação se encontrar expressa sobretudo em alguns dos trabalhos consultados de Savic. Por outro sugere-se como interessante a substituição, na abordagem do algoritmo genético utilizado, da rugosidade pelo diâmetro das condutas. Esta perspectiva, que assentaria a base da programação numa variável muito mais sensível e de amplitude mais abrangente (o diâmetro) poderia permitir eventualmente (pelo menos de forma mais sensível, certamente), quer a busca de erros grosseiros de cadastro relativamente a esta variável, quer a identificação de estados localizados de tuberculização e respectivas evoluções temporais sobre as condutas.

A outra, prende-se com o método de optimização dos parâmetros do algoritmo utilizado. Neste desiderato conclui-se que a abordagem indicada para a realização deste tipo de trabalhos poderia ser concretizada a partir da integração do algoritmo

genético num sistema de algoritmo evolucionário, de onde se poderiam seleccionar melhores abordagens de parâmetros, ou de processos, aplicáveis.

Apêndices

Apêndice A

Algoritmo Genético

A.1 Programa principal

```

clear all;      % "reset" completo da memória (incluindo todas as variáveis, mex-functions, etc..).
tic;            % início da contagem do tempo, para efeitos de acompanhamento da corrida do algoritmo.
echo off;
clc;            % apaga o ecrã.

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% BLOCO DE CONSTANTES A CONSIDERAR PELO ALGORITMO%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
escala = 1; % Escala temporal de aceleração do algoritmo
input_file = char( 'C:\MATLAB6p5\work\dados\rede.inp' ); % Nome do ficheiro de entrada de dados (extensão .inp)
Nssd = 24;    % Número de simulações significativas diárias.
Ndss = 2;     % Número de dias de simulação significativa para arquivo.
amostra = 100; % Percentagem de lugares da amostragem sobre N_amostras.
d_t = 3600 * 24 / Nssd; % Intervalo de tempo entre simulações (em segundos).
%
%
% Tipo de avaliação a efectuar pela função ENdistancia [- oo , -1] & [1 a 8]:
type = 2;
%
% ] -oo , 0[ - exponenciais type, de diferenças dimensionais;
% 1 - Diferença dimensional;
% 2 - Diferença dimensional quadrática;
% 3 - Diferença adimensional;
% 4 - Diferença adimensional quadrática;
% 5 - Diferença dimensional cruzada com adimensional;
% 6 - Diferença dimensional quadrática cruzada com adimensional quadrática;
% 7 - Diferença dimensional quadrática mais dimensional;
% 8 - Diferença adimensional quadrática mais adimensional;
%
limite_R = 48; % limite de gerações de rugosidade
XX_ = [2004 11 28 11 15 ]; % pergunta para sair
%[ano mes dia hora minuto]
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

echo on;
% Programa para calibração, em contínuo dinâmico, de uma rede de distribuição de água,

```

```

% por recurso a algoritmo genético.
%
% Rede hidráulica limite para calcular relativa a Ormsbee, L. E., Wood, D. J. (1986).
%
echo off;

ENepanet( 1 ); % Carregamento da biblioteca de funções 'epanet2'.

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
estado = 1; % Definição de estado para carregamento das variáveis globais. %
ENvariaveis_globais; % Carregamento das variáveis globais da biblioteca, por "script" de estado = 1. %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% carregamento da rede a calcular

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Constantes de localização dos dados e dos resultados: %
% input_file = char( 'C:\MATLAB6p5\work\dados\simples_1.inp' ); % Nome do ficheiro de entrada de dados (extensão .inp)
% input_file = char( 'C:\MATLAB6p5\work\dados\malha_2.inp' ); % Nome do ficheiro de entrada de dados (extensão .inp)
% output_file = char( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\rede.out' ); % Nome do ficheiro binário de saída.
% report_file = char( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\rede.rpt' ); % Nome do ficheiro de resultados.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Abertura do ficheiro de dados
error_code = ENopen( input_file ); ii = ENgetflowunits; if ( ii ~=
EN_LPS);
error( 'A rede nao se encontra em L/s. Corrigir esta situacao ...' );
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Definições temporais %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Nssd = Nssd; % Número de simulações significativas diárias.
Ndss = Ndss; % Número de dias de simulação significativa para arquivo.

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% "Assignment" das características gerais da programação (geométricas e de amostragem)  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
  
% Geometria:  
N_nos = ENgetcount( EN_NODECOUNT );  
N_tanks = ENgetcount( EN_TANKCOUNT );  
N_tubos = ENgetcount( EN_LINKCOUNT );  
N_junctions = N_nos - N_tanks;  
  
    % Numero total de nos da rede (inc. reserv.)  
    % Numero de reservatorios.  
    % Número de tubos da rede.  
    % Número de junções da rede.  
  
lugares_t = N_nos + N_tubos;  
Var_amostra = rand( 1 , lugares_t );  
% (de def. inicial aleatoria)  
% As N_nos primeiras posições: ==> nos;  
% As seguintes N_tubos posições: ==> tubos.  
  
global mascara_amostragem;  
mascara_amostragem = zeros( lugares_t , Nssd , Ndss);   % Definição de mascara de amostragem para nos e tubos.  
mascara_amostragem(:,:,:) = 0;  
  
global mascara_tanks;  
mascara_tanks = zeros( lugares_t , 1 );  
                                % Definição de mascara de reservatorios.  
  
% Especificação das localizações de reservatorios e tanques (loais de amostragem que sao considerados por defeito):  
nn = 0; %: numero fixo de pressoes e de caudais que sao permanentemente conhecidas nos reservatorios  
for ii = 1 : N_nos;  
    jj = ENgetnodetype( ii );  
    if ( jj == EN_RESERVOIR | jj == EN_TANK );  
        nn = nn + 1;  
        mascara_tanks(ii) = 1;%  
        for kk = 1 : N_tubos;  
            [AA , BB] = ENgetlinknodes( kk );  
            if (AA == ii | BB == ii);  
                <== nos  
            end  
        end  
    end  
end
```



```
mascara_tanks(kk+N_nos) = 1;% <== tubos
nn = nn + 1;
end;
end;
end;

% Estrutura da amostragem de dados:
lugares = lugares-t - nn;
N_amostras = round( lugares * amostra/100 ); % Cardinal da mascara da amostragem dinamica (excluindo reservatorios).
if (N_amostras < 1);
    N_amostras = 1;
end;

disp( ['A mascara de amostragem de reservatorios e composta por ',
      , num2str( nn ) , ' lugares de amostragem.' ] ); disp( ['A mascara
de amostragem fica definida para ', num2str( N_amostras ) , '
dispositivos em ', ...
                  , num2str( lugares ) , ' lugares possiveis.' ] );

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Estrutura de dados contínua do genetico
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% 1. Defini o inicial da popula o e de variáveis de índole genética
% Estrutura o de dados para: Cromossomas; Fenótipos; Objectivos; Fitness;

% A - RUGOSIDADE %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Nind_R = 100; % Número de indivíduos da popula o relativa a rugosidades
% % (este valor pode ser alterado ...)
Lgene_R = 8; % Comprimento binário de cada variável de rugosidade (ver justificacão da tese).
Lind_R = N_tubos * Lgene_R;% Comprimento total de cada cromossoma de rugosidades.

%vari veis auxiliares para determina o da constante "FieldR_R", para as rugosidades:
FieldDR_R = zeros( 2 , N_tubos ); % Variável FieldR_R
```

```

FieldDR_R(1,:) = 0.01;
FieldDR_R(2,:) = 2.55;

FieldDR_D = FieldDR_R;
FieldDR_D(1,:) = 90;
FieldDR_D(2,:) = 500;

FieldDR_Com = FieldDR_R;
FieldDR_Com(1,:) = 0.1; FieldDR_Com(2,:) = 1500;

chrom_R = crtrp( Nind_R , FieldDR_R ); % geração inicial de uma população de valor real, com Nind_R elementos, dotada de
% chrom_R = [Nind_R , N_tubos] % cromossomas com N_tubos elementos (crtrp, função do "Genetic Toolbox").

% Variável para localização do "ObjV_R" das rugosidades:
ObjV_R = zeros( Nind_R , 1 ); % Definição inicial aleatoria de "objective" para as rugosidades "ObjV_R".
ObjV_R_I = zeros( Nind_R , 1 ); % Variavel transitoria de "ObjV_R".

ObjV_R_I_P = ObjV_R_I; % Contribuição das pressões;
ObjV_R_I_Q = ObjV_R_I; % Contribuição dos caudais;

disp( ['"Assingment" da população de rugosidades em ' , ENtempo(
toc )] );

% B - CONSUMOS NOS NÓS
Nind_C = fix(Nind_R*0.13); % Número de indivíduos da população relativa aos consumos nos nós (este
if (Nind_C < 13); % número pode ser alterado).
Nind_C = 13;
end;

Lgene_C = 10; % Comprimento binário de cada variável de consumo nos nós (ver just. da tese).
Lind_C = N_junctions * Lgene_C; % Comprimento binário de cada cromossoma para consumo nos nós.

% Cromossoma de consumos nos nós variável, obtido por agregação de variáveis auxiliares parciais.

```


[illegible]

[illegible]

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Variáveis gerais definidas para o algoritmo genético
% Relações de crossover e mutação
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%relação de crossover para as rugosidades
global XOVR_R;
XOVR_R = 0.7;
%relação de mutação para as rugosidades
global MUTR_R;
MUTR_R = 1 / (Lind_R - 1);
%relação de crossover para os consumos nos nós
global XOVR_C;
XOVR_C = 0.7;
%relação de mutação para os consumos nos nós
global MUTR_C;
MUTR_C = 1 / (Lind_C - 1);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
error_code = 0;      % inicialização da variável para alocação dos erros de código de chamada do EPANET.
geracao_R = 0;      % geração actual de rugosidades.
geracao_C = 0;      % geração actual de consumo nos nós.

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Iniciação do EPANET -----
error_code = ENopenH;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% corrida do AG
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
XX = fix(clock);
nnn = 0;             % variavel de localização temporal da simulação.
menor_C = realmax; menor_C_1 = menor_C; menor_R = menor_C;

```

```

plot_C = 1;          % vector de registo para o grafico da varavel de consumo nos nos.
plot_R = 1;          % vector de registo para o grafico da varavel de rugosidade.

geracao_C_plot = geracao_C;

% Determinação inicial aleatoria do "melhor" chrom_R de rugosidade, no indice BB_R.
BB_R = chrom_R(1,:);      % Rugosidades correspondentes ao "melhor" chrom_R em BB_R.

% introdução constante dos diâmetros e dos comprimentos na estrutura de dados do prototipo do EPANET:
error_code = ENdiametros( 2 , FieldDR_D , nnn );      % Atribuição sistematizada de diâmetros as tubagens do modelo.
error_code = ENcomprimentos( 2 , FieldDR_Com , nnn );  % Atribuição sistematizada de comprimentos ao modelo.
error_code = ENaltitudes( 2 , FieldDR_Alt , nnn );     % Atribuição sistematizada de altitudes aos nos do modelo.

% inicialização aleatoria das variáveis necessárias para funcionamento do algoritmo:
disp( 'Inicialização aleatoria ...' ); for kkk = 1 : (Nssd * Ndss
- 1);
    disp( ['.', num2str( kkk) , ' / ' , num2str( Nssd * Ndss ) , '.'] );
    [jj , ii] = ENindices( kkk , Nssd );

    prototipo_C(:,jj,ii) = ENconsumos( 2 , FieldDR_C , nnn );
    prototipo_R(:,jj,ii) = ENrugosidades( 2 , FieldDR_R , nnn );;

    [prototipo_P(:,jj,ii) , prototipo_Q(:,jj,ii) , Nind] = ENcalculoH( prototipo_C(:,jj,ii)' , prototipo_R(:,jj,ii)' );

    chrom_C(:,jj,ii) = crtrp( Nind_C , FieldDR_C );
    chrom_C(:,jj,ii) = ENcontinuidade_C( chrom_C(:,jj,ii) , prototipo_C(:,jj,ii) );

    M_chrom_C(:,jj,ii) = chrom_C(1,:,jj,ii);          % 1ª definição aleatoria ...

    Var_amostra(:) = rand( 1 , lugares_t );           % 1ª definição aleatoria ...
    [AA , BB] = sort( Var_amostra );
    kk = lugares_t;
    mm = 0;
    while (mm < N_amostras );
        if (mascara_tanks(BB(kk))==0);

```



```

mascara_amostragem(BB(kk),jj,ii) = 1;      % 1ª definição aleatoria, função da 1ª "Var_amostra" definida
mm = mm + 1;
end;
kk = kk - 1;
end;
if (kk < 0);
    error( 'N_amostras excede o numero de lugares para amostragem !!! ...' );
end;
end;

Var_amostra = rand( 1 , lugares_t );

disp( ['Inicialização concluida em ', ENtempo( toc )] );

disp( '%          =====>  Inicio do calculo do algoritmo genetico      <=====      %' );
sair = 0;
%=====
while (~sair & geracao_R < limite_R);% colocar aqui o while "catch" infinito  <=====
%=====
% Re-acerto das definições de informação para o tempo decorrido de calculo:
nnn = nnn + 1;

% Passagem para a frente um momento, sobre as variaveis temporalizadas: %%%%%
for kkk = (Ndss * Nssd) : -1 : 2;
    [jj , ii] = ENindices( kkk , Nssd );
    [jjj_ , iii_] = ENindices( kkk-1 , Nssd );
    %
    prototipo_R(:,jj,ii) = prototipo_R(:,jjj_,iii_);
    prototipo_C(:,jj,ii) = prototipo_C(:,jjj_,iii_);
    %
    chrom_C(:,:,jj,ii) = chrom_C(:,:,jjj_,iii_);
    M_chrom_C(:,jj,ii) = M_chrom_C(:,jjj_,iii_);
    %
    prototipo_P(:,jj,ii) = prototipo_P(:,jjj_,iii_);

```

```

phen_P_med(:,jj,ii) = phen_P_med(:,jjj,iii_);
phen_P_var(:,jj,ii) = phen_P_var(:,jjj,iii_);
%
prototipo_Q(:,jj,ii) = prototipo_Q(:,jjj,iii_);
phen_Q_med(:,jj,ii) = phen_Q_med(:,jjj,iii_);
phen_Q_var(:,jj,ii) = phen_Q_var(:,jjj,iii_);
%
mascara_amostragem(:,jj,ii) = mascara_amostragem(:,jjj,iii_);
end;%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% "Erase" do momento inicial, para preenchimento no inicio do proximo ciclo.
prototipo_R(:,1,1) = NaN;
prototipo_C(:,1,1) = NaN;

chrom_C(:,1,1) = NaN;
M_chrom_C(:,1,1) = NaN;

prototipo_P(:,1,1) = NaN;
phen_P_med(:,1,1) = NaN;
phen_P_var(:,1,1) = NaN;

prototipo_Q(:,1,1) = NaN;
phen_Q_med(:,1,1) = NaN;
phen_Q_var(:,1,1) = NaN;

mascara_amostragem(:,1,1) = NaN;

% ALOCAÇÃO DE VALORES PARA O MOMENTO ACTUAL:

% Rugosidades
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Alocação estática das rug. ao protótipo, %
prototipo_R(:,1,1) = ENrugosidades( 2 , FieldDR_R , nnn ); % relativamente à constante vectorial de %
% dados de rugosidade da rede em estudo. %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

% Consumo dos nos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Preenchimento da matriz prototipo_C, para os consumos nos nos do prototipo. %
prototipo_C(:,1,1) = ENconsumos( 2 , FieldDR_C , nnn ); %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Inicialização dos consumos nos nos para o momento actual
chrom_C(:,1,1) = crtrp( Nind_C , FieldDR_C ); % Chromossoma de consumo nos nos da simulação do momento presente.
chrom_C(:,1,1) = ENcontinuidade_C( chrom_C(:,1,1) , prototipo_C(:,1,1) );

% Determinação do M_chrom_C do momento presente:
M_chrom_C(:,1,1) = chrom_C(1,:,1,1); % Melhor consumo nos nos inicial aleatorio.

% Alocação da variavel "mascara_amostragem":
[AA , BB] = sort( Var_amostra );
kk = lugares_t;
mmm = 0;
mascara_amostragem(:,1,1) = 0;
while ( mmm < N_amostras );
    if (mascara_tanks(BB(kk)) == 0);
        mascara_amostragem(BB(kk),1,1) = 1;
        mmm = mmm + 1;
    end;
    kk = kk - 1;
end;
if (kk < 0);
    error( 'N_amostras excede o numero de lugares para amostragem !!! ...' );
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calculo de "prototipo_P" e "prototipo_Q" pelo EPANET para o momento actual:
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[prototipo_P(:,1,1) , prototipo_Q(:,1,1) , Nind] = ENcalculoH( prototipo_C(:,1,1)' , prototipo_R(:,1,1)' ); %

```



```

BB_C = chrom_C(BB_C,:,jj,ii);
M_chrom_C(:,jj,ii) = BB_C;% 0 "melhor" chrom_C de rugosidade da presente geracao e tempo, no indice BB_C.%

if (AA < menor_C);
    menor_C = AA;
    geracao_C_plot = geracao_C;
    BB_C_plot = BB_C;
    prototipo_C_(:) = prototipo_C(:,jj,ii);
    prototipo_R_(:) = prototipo_R(:,jj,ii);
    %
    ObjV_C_P_ = ObjV_C_P(BB_C_,jj,ii);
    ObjV_C_Q_ = ObjV_C_Q(BB_C_,jj,ii);
    %
    pressoes_ = phen_P_T(BB_C_ ,:);
    caudais_ = phen_Q_T(BB_C_ ,:);
    %
    kkk_ = kkk;
end;

%
% GERAÇÃO DE CONSUMO NOS NOS:
SelCh_C = ENgenetico_C( ObjV_C(:,jj,ii) , chrom_C(:,jj,ii) , ...
    FieldR_C , prototipo_C(:,jj,ii) );
%
[ObjV_C_P_S , ObjV_C_Q_S] = ENavaliacao( type , SelCh_C , BB_R , prototipo_P(:,jj,ii) , ...
    prototipo_Q(:,jj,ii) , mascara_amostragem(:,jj,ii) );
ObjV_C_S = ObjV_C_P_S + ObjV_C_Q_S;
%
[ObjV_C_S , SelCh_C] = ENordem( ObjV_C_S , SelCh_C );
%
SelCh_C = recombina( 'recdis' , SelCh_C , XOVR_C );
%
% Inserimento sobre C:
chrom_C(:,jj,ii) = reins( chrom_C(:,jj,ii) , SelCh_C , 1 , [ 1 1] , ObjV_C(:,jj,ii) );
%
% elitismo sobre C:

```

```

chrom_C(:,jj,ii) = ENelitismo( chrom_C(:,jj,ii) , BB_C , FieldDR_C );
%
% continuidade sobre C:
chrom_C(:,jj,ii) = ENcontinuidade_C( chrom_C(:,jj,ii) , prototipo_C(:,jj,ii) );
%
% contador de C:
geracao_C = geracao_C + 1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% GERAÇÃO DE CONSUMO NOS NOS (fim) %%%%%%%%%%%%%%%
%
end; % for kkk = 1 : (Ndss * Ndss);
%
if (menor_C ~= menor_C_1);
    menor_C_1 = menor_C;
    % variavel para grafico_C
    X_C(plot_C) = geracao_C-plot;
    Y_C(plot_C) = menor_C;
    %
    % Objectividades reais:
    [OBJ_C_R , OBJ_R_R] = ENavaliacaoABS( type , BB_C-plot , BB_R , prototipo_C_ , prototipo_R_ );
    %
    OBJ_real_X( plot_C ) = geracao_C-plot;
    %
    OBJ_real_C_Y( plot_C ) = OBJ_C_R;
    OBJ_real_R_Y( plot_C ) = OBJ_R_R;
    %
    ObjV_C-plot_X( plot_C ) = geracao_C;
    %
    ObjV_C-P-plot_Y( plot_C ) = ObjV_C-P_;
    ObjV_C-Q-plot_Y( plot_C ) = ObjV_C-Q_;
    %
    plot_C = plot_C + 1;
    %
    pressoes = pressoes_;
    caudais = caudais_;
    % Difusao longitudinal completa no tempo, do melhor chrom_C.

```

```

for kkk = 1 : (Nssd * Ndss);
    [jj , ii] = ENindices( kkk , Nssd );
    chrom_C(Nind_C-3,:,jj,ii) = BB_C_plot(:);
end;
end;
[ObjV_R_I_P , ObjV_R_I_Q] = ENavaliacao_R( type , M_chrom_C , chrom_R , Nssd , Ndss );
ObjV_R = ObjV_R_I_P + ObjV_R_I_Q;
%
[AA , BB_R_] = min( ObjV_R );
BB_R = chrom_R(BB_R,:);
if (AA ~= menor_R);
    menor_R = AA;
    menor_R_P = ObjV_R_I_P(BB_R_);
    menor_R_Q = ObjV_R_I_Q(BB_R_);
    % variaveis para grafico_R
    X_R(plot_R) = geracao_R;
    Y_R(plot_R) = menor_R;
    Y_R_P(plot_R) = menor_R_P;
    Y_R_Q(plot_R) = menor_R_Q;
    plot_R = plot_R + 1;
end;
%
[ObjV_R , chrom_R] = ENordem( ObjV_R , chrom_R );
%
%          GERACAO DE RUGOSIDADES:%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
SelCh_R = ENgenetico_R( ObjV_R , chrom_R , FieldDR_R );
%
%
[Nind_R_S , AA] = size( SelCh_R );
%
ObjV_R_I_S = zeros( Nind_R_S, 1 );
ObjV_R_I_P_S = ObjV_R_I_S;
ObjV_R_I_Q_S = ObjV_R_I_S;
N_R = 0;
% Avaliacao da rugosidade:
[ObjV_R_I_P_S , ObjV_R_I_Q_S] = ENavaliacao_R( type , M_chrom_C , SelCh_R , Nssd , Ndss );

```

```

ObjV_R_I_S = ObjV_R_I_P_S + ObjV_R_I_Q_S;
%
[ObjV_R_I_S , SelCh_R] = ENordem( ObjV_R_I_S , SelCh_R );
%
if (ObjV_R_I_S(1) < ObjV_R(1));
    AA = chrom_R(1,:);
    chrom_R(1,:) = SelCh_R(1,:);
    SelCh_R(1,:) = AA;
end;
%
SelCh_R = recombina( 'recdis' , SelCh_R , XVR_R );
%
chrom_R = reins( chrom_R , SelCh_R , 1 , [1 1] , ObjV_R );
%
% Elitismo de chrom_R:
chrom_R = ENelitismo( chrom_R , BB_R , FieldDR_R);
%
% contador de R:
%
geracao_R = geracao_R + 1; %%% GERAÇÃO DE RUGOSIDADES (fim) %%%
%
tempo_total = toc;

% ===== QUADRO DE APRESENÇA DE RESULTADOS DE CADA GERAÇÃO DE RUGOSIDADES ===== %
%
clc;
[jj , ii] = ENindices( kkk_ , Nssd );
disp( 'Valores do prototipo que melhor se aproximam, na perspectiva dos consumos nos nos:' );
disp( [ ' dia = ' , num2str( ii ) , ' hora = ' , num2str( jj ) ] );
disp( [ ' mascara de reservatorios = [ ' , num2str( mascara_tanks' ) , ' ] ' ] );
disp( [ ' mascara de amostragem actual = [ ' , num2str( mascara_amostragem(:,1,1)' ) , ' ] ' ] );
disp( 'Prototipo:
===== ' );
disp( [ 'Consumo nos nos = [ ' , num2str( prototipo_C(:,jj,ii)' , 17 ) , ' ];' ] );
disp( [ 'Rugosidades = [ ' , num2str( prototipo_R(:,jj,ii)' , 17 ) , ' ];' ] );

```



```

disp( ' - ' );
disp( ['Pressoes
       = [ ' , num2str( prototipo_P(:,jj,ii)' , 17 ) , ' ]:'] );
disp( ['Caudais
       = [ ' , num2str( prototipo_Q(:,jj,ii)' , 17 ) , ' ]:'] );
disp( 'Melhor elemento de modelo: =====' );
disp( ['Consumo nos nos = [ ' , num2str( BB_C_plot , 17 ) , ' ]:'] );
disp( ['Rugosidades
       = [ ' , num2str( BB_R , 17 ) , ' ]:'] );
disp( ' - ' );
disp( ['Pressoes
       = [ ' , num2str( pressoes , 17 ) , ' ]:'] );
disp( ['Caudais
       = [ ' , num2str( caudais , 17 ) , ' ]:'] );
disp( '-----' );
disp( ['Geraçao_C = ' , num2str( geracao_C_plot , 9 ) , ...
       , Analise relativa ao momento ' , num2str(ENtempo(nnn*24/Nssd*3600))] );
disp( ['Geraçao_R = ' , num2str( geracao_R , 9 ) , '
       , Tempo total de algoritmo = ' , ...
       , num2str( ENtempo( tempo_total ) ) ] );
disp( ['Distancia aparente da "melhor" conjugação de consumo nos nos e rugosidades( type = ' , num2str( type ) , ' ):'] );
disp( [ '
       "Menor" erro aparente (persp. do consumo nos nos) = ' , num2str( menor_C , 17 ) ] );
disp( [ '
       contribuição das pressoes (ver dim.) = ' , num2str( ObjV_C_P_ , 17 ) ] );
disp( [ '
       contribuição dos caudais (ver dim.) = ' , num2str( ObjV_C_Q_ , 17 ) ] );
disp( ' - ' );
disp( [ '
       "Menor" erro aparente (persp. media da rug.) = ' , num2str( menor_R , 17 ) ] );
disp( [ '
       contribuição das pressoes (ver dim.) = ' , num2str( menor_R_P , 17 ) ] );
disp( [ '
       contribuição dos caudais (ver dim.) = ' , num2str( menor_R_Q , 17 ) ] );
disp( ' - ' );
disp( [ '
       Distancia real do "melhor" elemento ao prot. = ' , num2str( OBJ_C_R + OBJ_R_R , 17 ) ] );
disp( [ '
       contribuição dos consumos nos nos (ver dim.) = ' , num2str( OBJ_C_R , 17 ) ] );
disp( [ '
       contribuição das rugosidades (ver dim.) = ' , num2str( OBJ_R_R , 17 ) ] );
disp( '-----' );
% difusao dos melhores resultados de consumo nos nos, da frente e de traz, no tempo.
for kk = 2 : (Nssd * Ndss - 1);
    [jjj , iii] = ENindices( kk+1 , Nssd );
    %
    [jj , ii] = ENindices( kk , Nssd );
    chrom_C(Nind_C(:,jj,ii) = M_chrom_C(:,jjj,iii);

```

```
%
[ jjj_ , iii_] = ENindices( kk-1 , Nssd );
chrom_C(Nind_C-1,:,jj,ii) = M_chrom_C(:,jjj_,iii_);
end;
%
chrom_C(Nind_C,:,Nssd,Ndss) = M_chrom_C(:,1,1);
chrom_C(Nind_C-1,:,Nssd,Ndss) = M_chrom_C(:,Nssd-1,Ndss);
%
chrom_C(Nind_C,:,1,1) = M_chrom_C(:,2,1);
chrom_C(Nind_C-1,:,1,1) = M_chrom_C(:,Nssd,Ndss);
%
% Pergunta fixa para sair.
XX = fix(clock);
if ( XX(1) >= XX_(1)) ;% ano
    if ( (XX(1) >= XX_(1) + 1) | (XX(2) >= XX_(2)) ) ;% mes
        if ( (XX(2) >= XX_(2) + 1) | (XX(3) >= XX_(3)) ) ;% dia
            if ( (XX(3) >= XX_(3) + 1) | XX(4) >= XX_(4) ) ;% horas
                if ( (XX(4) >= XX_(4) + 1) | XX(5) >= XX_(5)) ;% minutos
                    sair = 1;
                end;
            end;
        end;
    end;
end;
end;
end;
end;
end;
end;
end;% while (toc - tempo < d_t & geracao_R < limite_R & ~sair)%%%%%%%%%%%sair%%%%%%%%%%
% Determinação da Variancia das amostras de pressao e caudais do fenotipo, para efeitos da definição da mascara de
% determinação da variancia das amostras
Var_amostra(:) = 0;
for kkk = 1 : (Nssd * Ndss);
    [jj , ii] = ENindices( kkk , Nssd);
    for kk = 1 : N_nos;
        Var_amostra(kk) = Var_amostra(kk) + phen_P_var(kk,jj,ii);
    end;
```

```

for kk = 1 : N_tubos;
    Var_amostra(kk+N_nos) = Var_amostra(kk+N_nos) + phen_Q_var(kk,jj,ii);
end;

end;

if (geracao_R >= Nssd*Ndss | sair==1);
    %%%%%%%%%%%%% Bloco de gravação de resultados actuais para posterior "retrieve" %%%%%%%%%%%%%
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\XX', 'XX' );
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\Nssd', 'Nssd' );
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\type', 'type' );
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\tempo_total', 'tempo_total' );
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\kkk', 'kkk' );
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\mascara_tanks', 'mascara_tanks' );
    %
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\mascara_amostragem', 'mascara_amostragem' );
    %
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\prototipo_R', 'prototipo_R' );
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\chrom_R', 'chrom_R' );
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\ObjV_R', 'ObjV_R' );
    %
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\prototipo_C', 'prototipo_C' );
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\chrom_C', 'chrom_C' );
    %
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\ObjV_C', 'ObjV_C' );
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\OBJ_C_R', 'OBJ_C_R' );
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\OBJ_R_R', 'OBJ_R_R' );
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\ObjV_C_P', 'ObjV_C_P' );
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\ObjV_C_Q', 'ObjV_C_Q' );
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\M_chrom_C', 'M_chrom_C' );
    %
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\prototipo_P', 'prototipo_P' );
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\phen_P_med', 'phen_P_med' );
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\phen_P_var', 'phen_P_var' );
    %
    save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\prototipo_Q', 'prototipo_Q' );

```

```

save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\phen_Q_med' , 'phen_Q_med' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\phen_Q_var' , 'phen_Q_var' );
%
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\geracao_C' , 'geracao_C' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\geracao_R' , 'geracao_R' );
%
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\nnn' , 'nnn' );
%
% dados para grafico
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\menor_R' , 'menor_R' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\menor_R_P' , 'menor_R_P' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\menor_R_Q' , 'menor_R_Q' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\menor_C' , 'menor_C' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\menor_C_1' , 'menor_C_1' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\plot_R' , 'plot_R' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\plot_C' , 'plot_C' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\BB_C_plot' , 'BB_C_plot' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\X_C' , 'X_C' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\Y_C' , 'Y_C' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\X_R' , 'X_R' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\Y_R' , 'Y_R' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\Y_R_P' , 'Y_R_P' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\Y_R_Q' , 'Y_R_Q' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\OBJ_real_X' , 'OBJ_real_X' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\OBJ_real_R_Y' , 'OBJ_real_R_Y' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\OBJ_real_C_Y' , 'OBJ_real_C_Y' );
%
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\ObjV_C_P_plot_Y' , 'ObjV_C_P_plot_Y' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\ObjV_C_Q_plot_Y' , 'ObjV_C_Q_plot_Y' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\geracao_C_plot' , 'geracao_C_plot' );
%
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\pressoes' , 'pressoes' );
save( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\caudais' , 'caudais' );
%
error_code = ENsaveinfile( 'C:\MATLAB6p5\work\resultados\rede.inp' );

```

```

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end;

%=====
end;% while ~(sair) | gerações_R < valor;
%=====
% plot na perspectiva dos consumo nos nos (valores mínimos):
figure( 1 );

axis auto; subplot( 2 , 3 , 2 ); plot( X_C/Nssd , Y_C , '.' );
title( "Menor" erro estimado (na persp. dos consumos nos nos):'
); xlabel( 'geracao_R' ); ylabel( 'err ^2' );

subplot( 2 , 3 , 4 ); plot( X_C/Nssd , ObjV_C_P-plot_Y , '.' );
title( 'Erro contribuido pelas diferenças de pressao:' ); xlabel(
'geracao_R' ); ylabel( 'err ^2' );

subplot( 2 , 3 , 6 ); plot( X_C/Nssd , ObjV_C_Q-plot_Y , '.' );
title( 'Erro contribuido pelas diferenças de caudal:' ); xlabel(
'geracao_R' ); ylabel( 'err ^2' );

% plot na perspectiva das rugosidades (valores medios):
figure( 2 );

axis auto; subplot( 2 , 3 , 2 ); plot( X_R , Y_R , '.' ); title(
'Menor" erro medio estimado (na persp. das rugosidades):' );
xlabel( 'geracao_R' ); ylabel( 'err ^2' );

subplot( 2 , 3 , 4 ); plot( X_R , Y_R_P , '.' ); title( 'Erro
contribuido pelas diferenças de pressao:' ); xlabel( 'geracao_R'
); ylabel( 'err ^2' );

subplot( 2 , 3 , 6 ); plot( X_R , Y_R_Q , '.' ); title( 'Erro
contribuido pelas diferenças de caudal:' ); xlabel( 'geracao_R'

```

```

); ylabel( 'err ^2' );

% plot de diferenças quadraticas "reais" (diferenças directas entre as rugosidades e os consumos dos nos):
figure( 3 );

axis auto; subplot( 2 , 3 , 2 ); plot( OBJ_real_X/Nssd ,
OBJ_real_R_Y + OBJ_real_C_Y , ',' ); title( 'Erro real' ); xlabel(
'geracao_R' ); ylabel( 'err ^2' );

subplot( 2 , 3 , 4 ); plot( OBJ_real_X/Nssd , OBJ_real_R_Y , ','
); title( 'Erro real contribuido pela rugosidade:' ); xlabel(
'geracao_R' ); ylabel( 'err ^2' );

subplot( 2 , 3 , 6 ); plot( OBJ_real_X/Nssd , OBJ_real_C_Y , ','
); title( 'Erro real contribuido pelo consumo nos nos:' ); xlabel(
'geracao_R' ); ylabel( 'err ^2' );

tempo_total = toc;

disp( ' ' ); disp( ' ' ); disp( ['O PROGRAMA CORREU DURANTE ' ,
num2str( ENtempo( tempo_total ) )] ); disp( ['Foram integrados '
, num2str( nnn ) , ' ciclos de analise historica.'] ); disp( ['As
gerações de consumo nos nos foram ' , num2str( geracao_C ) , '']
); disp( ['As gerações de rugosidade foram ' , num2str( geracao_R
) , ''] );

% error_code = ENepanet( 0 ); % Fecho da biblioteca do EPANET e descarregamento das variaveis globais

```

A.2 Sub-rotina *ENaltitudes.m*

```

% ENaltitudes.m      (define uma estrutura de altitudes para um determinado prototipo)
%
% Versão 0      14-Novembro-2003.
% Versão final 18-Novembro-2003.

```

```

%
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.
%
%
% Syntax: error_code = ENaltitudes( type , FieldDR_Alt , nnn );
%
% Parametros de "Input":
% type - tipo de consumo a definir;
% 1 - aleatorio;
% 2 - constante, definido previamente;
% 3 - função da distancia temporal (ainda nao definido);
% etc.
%
% FieldDR_Alt - Estrutura de dados a criar;
% nnn - distancia temporal.
%
% Parâmetros de "Output":
% error_code - codigo de resultado;
%
function error_code = ENaltitudes( type , FieldDR_Alt , nnn );
global EN_ELEVATION EN_TANKLEVEL EN_JUNCTION;
[nn , N_nos] = size( FieldDR_Alt );
if (nn ~= 2);
    error( 'Erro na dimensao de FieldDR_Alt da função ENaltitudes ...' );
end;
altitudes = zeros( N_nos , 1 );

```

```

switch type;
case 1;%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    ii = 1;
    nn = (FieldDR_Alt(2,ii) + FieldDR_Alt(1,ii)) / 2;
    while (ii <= N_nos);
        jj = ENgetnodetype( ii );
        mm = rand*(FieldDR_Alt(2,ii)-FieldDR_Alt(1,ii))*1.1 + nn;
        while (mm < FieldDR_Alt(1,ii) | (mm > FieldDR_Alt(2,ii)));
            mm = rand*(FieldDR_Alt(2,ii)-FieldDR_Alt(1,ii))*1.1+nn;
        end;
        mm = round( mm * 10 ) / 10;
        if (jj == EN_JUNCTION);
            altitudes(ii) = mm;
            ii = ii + 1;
        else;
            altitudes(ii) = 105;
            error_code = ENsetnodevalue( ii , EN_TANKLEVEL , 2.5);
        end;
    end;
end;
if (ii ~= N_junctions + 1);
    error( 'Numero de atribuiçoes de altitudes nao consistente com os dados ...' );
end;
case 2;%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    altitudes_ = [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0];
    for ii = 1 : N_nos;
        jj = ENgetnodetype( ii );
        if (jj == EN_JUNCTION);
            altitudes(ii) = altitudes_(ii);
        else;
            altitudes(ii) = 105;
            error_code = ENsetnodevalue( ii , EN_TANKLEVEL , 2.5);
        end;
    end;
end;
case 3;%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    error( 'Hipotese de "type" ainda nao definida na funcao ENaltitudes ...' );

```



```

otherwise;
    error( 'Erro no parametro type da função ENaltitudes ...' );
end;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Aceitam-se outras sugestões para este bloco. <=== %%%%%%%%%%%%%%%
error_code = 0;

for ii = 1 : N_nos;
    error_code = ENsetnodevalue( ii , EN_ELEVATION , altitudes(ii) ) + error_code;
end;

% End of function

```

A.3 Sub-rotina *ENavaliacao.m*

```

% ENavaliacao.m      (perante um chrom_C e um chrom_R par, "retriva" o ObjV (C ou R) correspondente)
%
% Versão 0      25-Setembro-2003.
% Versão final  29-Setembro-2003 (diferenças quadráticas adimensionais);
%              07-Novembro-2003 (diferenças lineares adimensionais);
%              10-Novembro-2003 (diferenças dimensionais);
%              11-Novembro-2003 (separação entre pressões e caudais em ObjV_P e ObjV_Q).
%              27-Novembro-2003 (introdução da variável de input "type" e da rotina ENSoma).
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO

```

```

% PORTUGAL.
%
% Syntax: [ObjV_P , ObjV_Q , phen_P_T , phen_Q_T] = ENavaliacao( type , chrom_C , chrom_R , prototipo_P , prototipo_Q , mascara_amostragem );
%
% Parametros de "Input":
%   type           - tipo de avaliação (dimensional, adimensional, quadratica, ... etc);
%   chrom_C        - cromossoma de consumos a obter objectivos;
%   chrom_R        - a rugosidade par;
%   prototipo_P    - prototipo de pressões a considerar;
%   prototipo_Q    - prototipo de caudais a considerar;
%   mascara_amostragem - mascara de amostragem.
%
% Parâmetros de "Output":
%   ObjV_P         - resultado de objectivos do chrom_C ou chrom_R relativo a pressões;
%   ObjV_Q         - resultado de objectivos do chrom_C ou chrom_R relativo a caudais;
%   phen_P_T       - resultado de phenotipo de pressões (opcional);
%   phen_Q_T       - resultado de phenotipo de caudais (opcional).

function [ObjV_P , ObjV_Q , phen_P_T , phen_Q_T] = ENavaliacao(
type , chrom_C , chrom_R , prototipo_P , prototipo_Q ,
mascara_amostragem );

global mascara_tanks; global EN_NODECOUNT EN_TANKCOUNT
EN_LINKCOUNT;

N_nos = ENgetcount( EN_NODECOUNT ); N_junctions = N_nos -
ENgetcount( EN_TANKCOUNT ); N_tubos = ENgetcount( EN_LINKCOUNT );

[phen_P_TI , phen_Q_TI , Nind] = ENcalculoH( chrom_C , chrom_R );

ObjV_P = zeros( Nind , 1 ); ObjV_Q = zeros( Nind , 1 );

% AVALIAÇÃO:
for mm = 1 : Nind;
    % Variavel parcial "ObjV_P":

```

```

for kk = 1 : N_nos;
    if ( mascara_amostragem(kk) == 1 | mascara_tanks(kk) == 1 );
        ObjV_P(mm) = ObjV_P(mm) + ENdistancia( type , prototipo_P(kk) , phen_P_TI(mm,kk) );
    end;%end if
end;% end for kk
% Variavel "ObjV_Q:
for kk = 1 : N_tubos;
    if ( mascara_amostragem(kk+N_nos) == 1 | mascara_tanks(kk+N_nos) == 1 );
        ObjV_Q(mm) = ObjV_Q(mm) + ENdistancia( type , prototipo_Q(kk) , phen_Q_TI(mm,kk) );
    end;%end if
end;% end for kk
% Variavel ObjV:
end; % for mm

caso = -1;

if (nargout == 2);
    caso = 1;
end;

if (nargout == 4);
    caso = 2;
end;

switch caso;
    case 1;

    case 2;
        phen_P_T = phen_P_TI;
        phen_Q_T = phen_Q_TI;
        otherwise
            error( 'Erro de input nos argumentos da função ENavaliacao ...' );
        end;

% End of function

```

A.4 Sub-rotina *ENavaliacao_C.m*

```
% ENavaliacao_C.m      (perante um chrom_C e um chrom_R par, "retriva" o ObjV (C ou R) correspondente)
%
% Versão 0      25-Setembro-2003.
% Versão final  29-Setembro-2003 (diferenças quadráticas adimensionais);
%              07-Novembro-2003 (diferenças lineares adimensionais);
%              10-Novembro-2003 (diferenças dimensionais);
%              11-Novembro-2003 (separação entre pressões e caudais em ObjV_P e ObjV_Q).
%              20-Novembro-2003 (separação entre ENavaliacao_C e ENavaliacao_R).
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.
%
% Syntax:  [ObjV_P , ObjV_Q , phen_P_T , phen_Q_T] = ENavaliacao_C( chrom_C , chrom_R , prototipo_P , prototipo_Q , mascara_amostragem );
%
% Parametros de "Input":
%   chrom_C      - cromossoma de consumos a obter objectivos;
%   chrom_R      - a rugosidade par;
%   prototipo_P  - prototipo de pressões a considerar;
%   prototipo_Q  - prototipo de caudais a considerar;
%   mascara_amostragem - mascara de amostragem.
%
% Parâmetros de "Output":
%   ObjV_P      - resultado de objectivos do chrom_C ou chrom_R relativo a pressões;
%   ObjV_Q      - resultado de objectivos do chrom_C ou chrom_R relativo a caudais.
%
function [ObjV_P , ObjV_Q , phen_P_T , phen_Q_T] = ENavaliacao_C(
```

```

chrom_C , chrom_R , prototipo_P , prototipo_Q , mascara_amostragem
);

global mascara_tanks; global EN_NODECOUNT EN_TANKCOUNT
EN_LINKCOUNT;

N_nos = ENgetcount( EN_NODECOUNT ); N_junctions = N_nos -
ENgetcount( EN_TANKCOUNT ); N_tubos = ENgetcount( EN_LINKCOUNT );

%[phen_P_TI , phen_Q_TI] = ENcalculoH( chrom_C , chrom_R );

[Nind_C , CC] = size( chrom_C ); [BB , DD] = size( chrom_R );

if ( BB ~= 1 );
    error( 'Erro na definição cruzada dos dados na função ENavaliação_C ...' );
end;

if ( (CC ~= N_junctions) | (DD ~= N_tubos) );
    error( 'Erro na definição das dimensões dos dados na função ENavaliação_C ...' );
end;

ObjV_P = zeros( Nind_C , 1 ); ObjV_Q = zeros( Nind_C , 1 );

phen_P_T = zeros( Nind_C , N_nos ); phen_Q_T = zeros(Nind_C ,
N_tubos );

% AVALIAÇÃO:
for mm = 1 : Nind_C;
    [phen_P_TI , phen_Q_TI] = ENcalculoHH( chrom_C(mm,:) , chrom_R );

    phen_P_T(mm,:) = phen_P_TI;
    phen_Q_T(mm,:) = phen_Q_TI;

    % Variavel parcial "ObjV_P":
    for kk = 1 : N_nos;

```

```

if ( mascara_amostragem(kk) == 1 | mascara_tanks(kk) == 1 );
    AA = prototipo_P(kk);
    ObjV_P(mm) = ObjV_P(mm) + ( ( phen_P_TI(kk) - AA ) )^2;    % <===== dimensional quadratico
end;%end if
end;% end for kk
% Variavel "ObjV_Q:
for kk = 1 : N_tubos;
    if ( mascara_amostragem(kk+N_nos) == 1 | mascara_tanks(kk+N_nos) == 1 );
        AA = prototipo_Q(kk);
        ObjV_Q(mm) = ObjV_Q(mm) + ( ( phen_Q_TI(kk) - AA ) )^2;    % <===== dimensional quadratico
    end;%end if
end;% end for kk
end; % for mm

% End of function

```

A.5 Sub-rotina *ENavaliacao_R.m*

```

% ENavaliacao_R.m      (perante um M_chrom_C e um chrom_R par, "retriva" o ObjV_R correspondente)
%
% Versão 0      25-Setembro-2003.
% Versão final  29-Setembro-2003 (diferenças quadráticas adimensionais);
%              07-Novembro-2003 (diferenças lineares adimensionais);
%              10-Novembro-2003 (diferenças dimensionais);
%              11-Novembro-2003 (separação entre pressões e caudais em ObjV_P e ObjV_Q).
%              20-Novembro-2003 (separação entre ENavaliacao e ENavaliacao_R);
%              27-Novembro-2003 (introdução da variável de input "type" e da rotina ENSoma).
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,

```

```

% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.
%
% Syntax: function [ObjV_P_R , ObjV_Q_R] = ENavaliacao_R( type , M_chrom_C , chrom_R , Nssd , Ndss );
%
% Parametros de "Input":
% type
% M_chrom_C
% chrom_R
% prototipo_P
% prototipo_Q
% mascara_amostragem
% Nssd , Ndss
%
% Parâmetros de "Output":
% ObjV_P_R
% ObjV_Q

function [ObjV_P_R , ObjV_Q_R] = ENavaliacao_R( type , M_chrom_C ,
chrom_R , Nssd , Ndss );

global mascara_tanks; global prototipo_P prototipo_Q
mascara_amostragem;

ObjV_P_R = 0; ObjV_Q_R = 0; N_R = 0;

for kkk = 1 : (Ndss * Nssd);
    [jj , ii] = ENindices( kkk , Nssd );
    [AA_P , AA_Q] = ENavaliacao( type , M_chrom_C(:,jj,ii)' , chrom_R , prototipo_P(:,jj,ii) , ...
        prototipo_Q(:,jj,ii) , mascara_amostragem(:,jj,ii) );
    ObjV_P_R = ObjV_P_R + AA_P;
    ObjV_Q_R = ObjV_Q_R + AA_Q;
    N_R = N_R + 1;
end;

```

```
ObjV_P_R = ObjV_P_R / N_R; ObjV_Q_R = ObjV_Q_R / N_R;
```

```
% End of function
```

A.6 Sub-rotina *ENavaliacaoABS.m*

```
% ENavaliacaoABS.m      (perante um individuo_C e um individuo_R par, "retriva" a distancia ao prototipo real correspondente)
%
% Versão 0      28-Novembro-2003.
% Versão final  28-Novembro-2003.
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.
%
% Syntax:  [OBJ_C_R , OBJ_R_R] = ENavaliacaoABS( type , chrom_C , chrom_R , prototipo_C , prototipo_R );
%
% Parametros de "Input":
%      type      - tipo de avaliação (dimensional, adimensional, quadratica, ... etc);
%      chrom_C   - cromossoma de consumos a obter objectivos;
%      chrom_R   - a rugosidade par;
%      prototipo_C - prototipo de consumos nos nos a considerar;
%      prototipo_R - prototipo de rugosidades a considerar.
%
% Parâmetros de "Output":
%      OBJ_C_R   - resultado de objectivos reais do chrom_C;
%      OBJ_R_R   - resultado de objectivos do chrom_R relativo a rugosidades.
```



```

function [OBJ_C_R , OBJ_R_R] = ENavaliacaoABS( type , chrom_C ,
chrom_R , prototipo_C , prototipo_R );

if ( (size( chrom_C ) ~= size( prototipo_C )) | (size( chrom_R )
~= size( prototipo_R )) );
    error( 'Definição cruzada de dimensoes errada na função ENavaliacaoABS ...' );
end;

[AA , N_junctions] = size( chrom_C ); [AA , N_tubos] = size (
chrom_R );

% Calculo das objectividades reais:
OBJ_C_R = 0; for kk = 1 : N_junctions;
    OBJ_C_R = OBJ_C_R + ENdistancia( type , chrom_C(kk) , prototipo_C(kk) ); % contribuição do consumo nos nos
end;

OBJ_R_R = 0; for kk = 1 : N_tubos;
    OBJ_R_R = OBJ_R_R + ENdistancia( type , chrom_R(kk) , prototipo_R(kk) ); % contribuição das rugosidades
end;

% End of function

```

A.7 Sub-rotina *ENavaliacao.m*

```

% ENavaliacao.m      (perante um chrom_C e um chrom_R par, "retriva" o ObjV (C ou R) correspondente)
%
% Versão 0      25-Setembro-2003.
% Versão final  29-Setembro-2003 (diferenças quadraticas adimensionais);
%              07-Novembro-2003 (diferenças lineares adimensionais);
%              10-Novembro-2003 (diferenças dimensionais);
%              11-Novembro-2003 (separação entre pressoes e caudais em ObjV_P e ObjV_Q).
%              19-Novembro-2003.
%

```

```

% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.
%
%
% Syntax: [ObjV_P , ObjV_Q , phen_P_T , phen_Q_T] = ENavaliacao( chrom_C , chrom_R , prototipo_P , prototipo_Q , mascara_amostragem );
%
% Parametros de "Input":
% chrom_C - cromossoma de consumos a obter objectivos;
% chrom_R - a rugosidade par;
% prototipo_P - prototipo de pressoes a considerar;
% prototipo_Q - prototipo de caudais a considerar;
% mascara_amostragem - mascara de amostragem.
%
% Parâmetros de "Output":
% ObjV_P - resultado de objectivos do chrom_C ou chrom_R relativo a pressoes;
% ObjV_Q - resultado de objectivos do chrom_C ou chrom_R relativo a caudais.
%
function [ObjV_P , ObjV_Q , phen_P_T , phen_Q_T] = ENavaliacao(
chrom_C , chrom_R , prototipo_P , prototipo_Q , mascara_amostragem
);
global mascara_tanks; global EN_NODECOUNT EN_TANKCOUNT
EN_LINKCOUNT;
N_nos = ENgetcount( EN_NODECOUNT ); N_junctions = N_nos -
ENgetcount( EN_TANKCOUNT ); N_tubos = ENgetcount( EN_LINKCOUNT );
%[phen_P_TT , phen_Q_TT] = ENcalculoH( chrom_C , chrom_R );

```

```

[AA , CC] = size( chrom_C ); [BB , DD] = size( chrom_R );

Nind = max( [AA , BB] ); if (min( [AA , BB] ) ~= 1);
    error( 'Erro na definição cruzada dos dados na função ENavaliaçãoH ...' );
end;

ObjV_P = zeros( Nind , 1 ); ObjV_Q = zeros( Nind , 1 );

% AVALIAÇÃO:
for mm = 1 : Nind;
    [phen_P_TI , phen_Q_TI] = ENcalculoH( chrom_C , chrom_R )

    % Variavel parcial "ObjV_P":
    for kk = 1 : N_nos;
        if ( mascara_amostragem(kk) == 1 | mascara_tanks(kk) == 1 );
            AA = prototipo_P(kk);
            ObjV_P(mm) = ObjV_P(mm) + ( ( phen_P_TI(mm,kk) - AA ) )^2;    % <===== dimensional quadratico
        end;%end if
    end;% end for kk
    % Variavel "ObjV_Q:
    for kk = 1 : N_tubos;
        if ( mascara_amostragem(kk+N_nos) == 1 | mascara_tanks(kk+N_nos) == 1 );
            AA = prototipo_Q(kk);
            ObjV_Q(mm) = ObjV_Q(mm) + ( ( phen_Q_TI(mm,kk) - AA ) )^2;    % <===== dimensional quadratico
        end;%end if
    end;% end for kk
    % Variavel ObjV:
    end; % for mm

    caso = -1;

    if (nargout == 2);
        caso = 1;

```

```

end;

if (nargout == 4);
    caso = 2;
end;

switch caso;
    case 1;

        case 2;
            phen_P_T = phen_P_TT;
            phen_Q_T = phen_Q_TT;
            otherwise
                error( 'Erro de input nos argumentos da função ENavaliacao ...' );
            end;

        % End of function

% ENcalculoH.m      (calcula os valores de populações de pressões e de caudais)
%
% Versão 0      25-Setembro-2003.
% Versão final  20-Novembro-2003.
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.

```

A.8 Sub-rotina *ENcalculoH.m*

```

% Syntax: [pressoes , caudais , Nind] = ENcalculoH( consumos , rugosidades );
%
% Parametros de "Input":
%   consumos - individuo/população de consumos nos nos;
%   rugosidades - individuo/população de rugosidades.
%
% Parâmetros de "Output":
%   pressoes - individuo/população de pressoes nos nos;
%   caudais - individuo/população de caudais nas tubagens.

function [pressoes , caudais , Nind] = ENcalculoH( consumos ,
rugosidades );

global EN_NODECOUNT EN_TANKCOUNT EN_LINKCOUNT EN_JUNCTION; global
EN_BASEDEMAND EN_ROUGHNESS EN_HEAD EN_FLOW EN_PRESSURE;

N_nos = ENgetcount( EN_NODECOUNT ); N_junctions = N_nos -
ENgetcount( EN_TANKCOUNT ); N_tubos = ENgetcount( EN_LINKCOUNT );

[Nind_C , AA] = size( consumos ); if (AA ~= N_junctions);
    error( 'Variaveis de consumos colocadas em coluna na função ENcalculoH ...' );
end;

[Nind_R , AA] = size( rugosidades ); if (AA ~= N_tubos);
    error( 'Variaveis de rugosidades colocadas em coluna na função ENcalculoH ...' );
end;

if (Nind_C ~= 1 & Nind_R ~= 1);
    error( 'Dimensao cruzada dos dados mal estabelecida ...' );
end;

% determinação do caso, na dimensao dos vectores de dados:
caso = -1; if (Nind_C == 1 & Nind_R == 1);
    Nind = 1;

```

```

        caso = 0;
    else;
        if (Nind_C == 1);
            Nind = Nind_R;
            caso = 1;
        end;
        if (Nind_R == 1);
            Nind = Nind_C;
            caso = 2;
        end;
    end;

    presoes = zeros( Nind , N_nos ); caudais = zeros( Nind , N_tubos
    );

    switch caso;
    case 0;% Nind_C == 1 & Nind_R == 1;
        %set de consumos nos nos
        ii = 1;
        for kk = 1 : N_nos;
            if (ENgetnodetype( kk ) == EN_JUNCTION);
                error_code = ENsetnodevalue( kk , EN_BASEDEMAND , consumos(ii) );
                ii = ii + 1;
            end;% if
        end;% for kk

        % "set" de rugosidades aos tubos:
        for kk= 1 : N_tubos;
            error_code = ENsetlinkvalue( kk , EN_ROUGHNESS , rugosidades(kk) );
        end;% for kk

        % obtenção dos resultados para a situação:
        error_code = ENSolveH;          % <===== corrida do simulador para a situação em causa.

```


A.9 Sub-rotina *ENcalculoHH.m*

```
% ENcalculoHH.m      (calcula um conjunto de valores de pressoes e de caudais, resultante de outro de consumos e de rugosidades)
%
% Versão 0      20-Novembro-2003.
% Versão final  20-Novembro-2003.
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.
%
% Syntax:  [pressoes , caudais] = ENcalculoHH( consumos , rugosidades );
%
% Parametros de "Input":
% consumos - individuo/população de consumos nos nos;
% rugosidades - individuo/população de rugosidades.
%
% Parâmetros de "Output":
% pressoes - individuo/população de pressoes nos nos;
% caudais - individuo/população de caudais nas tubagens.
%
function [pressoes , caudais ] = ENcalculoHH( consumos ,
rugosidades );

global EN_NODECOUNT EN_TANKCOUNT EN_LINKCOUNT EN_JUNCTION; global
EN_BASEDEMAND EN_ROUGHNESS EN_HEAD EN_FLOW EN_PRESSURE;

N_nos = ENgetcount( EN_NODECOUNT ); N_junctions = N_nos -
ENgetcount( EN_TANKCOUNT ); N_tubos = ENgetcount( EN_LINKCOUNT );
```



```

%
% Parâmetros de "Output":
%   error_code           - indicação de funcionamento;
%   0 - sem problemas.

function error_code = ENcomprimentos( type , FieldDR_Com , nnn );

global EN_LENGTH;

[nn , N_tubos] = size( FieldDR_Com ); if (nn ~= 2);
    error( 'Erro na dimensao de FieldDR_Com da função ENcomprimentos ...' );
end; comprimentos = zeros( N_tubos , 1 );

switch type;
case 1; %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%   nn = (FieldDR_Com(2,ii) + FieldDR_Com(1,ii)) / 2;
%   for ii = 1 : N_tubos;
%       mm = rand*(FieldDR_Com(2,ii)-FieldDR_Com(1,ii))*1.1 + nn;
%       while (mm < FieldDR_Com(1,ii) | (mm > FieldDR_Com(2,ii) ));
%           mm = rand*(FieldDR_Com(2,ii)-FieldDR_Com(1,ii))*1.1+nn;
%       end;
%       mm = round( mm * 10 ) / 10;
%       comprimentos(ii) = mm;
%   end;
%
%   case 2; %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   comprimentos_ = [ 450 250 170 250 170 150 160 140 140 300 ...
%       300 200 200 300 175 250 150 299 1 80 300 200];
%
%   % Rotina de criação constante de um maximo de 22 comprimuntos.
%   for ii = 1 : N_tubos;
%       comprimentos(ii) = comprimentos_(ii);
%   end;
%   case 3; %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   error( 'Hipotese de type ainda nao definida na função ENcomprimentos ...' );

```



```

% Parametros de "Input":
% type
% - tipo de consumo a definir;
% 1 - aleatorio;
% 2 - constante, definido previamente;
% 3 - funcao da distancia temporal (ainda nao definido);
% etc.
% FieldDR_C
% - Estrutura de dados a criar;
% nnn
% - distancia temporal.
%
% Parâmetros de "Output":
% consumos
% - consumos de resultado;

function consumos = ENconsumos( type , FieldDR_C , nnn );

switch type;
case 1; %%%%%%%%%%%%%%%
global EN_JUNCTION;
[nn , N_junctions] = size( FieldDR_C );
if (nn ~= 2);
error( 'Erro na dimensao de FieldDR_C da funcao ENconsumos ...' );
end;
consumos = zeros( N_junctions , 1 );
%
% ii = 1;
% jj = 1;
% nn = (FieldDR_C(2,ii) + FieldDR_C(1,ii)) / 2;
% while (ii <= N_junctions & jj <= N_nos);
% mm = rand*(FieldDR_C(2,ii)-FieldDR_C(1,ii))*1.1 + nn;
% while (mm < FieldDR_C(1,ii) | (mm > FieldDR_C(2,ii) ));
% mm = rand*(FieldDR_C(2,ii)-FieldDR_C(1,ii))*1.1+nn;
% end;
% mm = round( mm * 10 ) / 10;
% if (ENgetnodetype( ii ) == EN_JUNCTION);
% consumos(ii) = mm;
% ii = ii + 1;
%
% Esta rotina cria um conjunto uniforme de dados
% de protótipo para consumos nos nós, consistente
% com o espaço amostral de busca pelo AG (todos os
% valores de intervalo, limites incluídos),
% aferindo aos dados uma precisão de decilitro/s.
% Estes valores podem alternativamente ser sugeridos através
% de uma variação assimilável a uma função contínua e
% diferenciável, analisável em termos históricos através de

```

```

end;
jj = jj + 1;
end;
if (ii ~= N_junctions + 1);
    error( 'Numero de atribuicoes de consumos nao consistente com os dados ...' );
end;
%
%
case 2; %%% uma análise de Fourier, ou estatística, de espectro, análise
        % amostral, ou probabilística.
        %
        [nn , N_junctions] = size( FieldDR_C );
        if (nn ~= 2);
            error( 'Erro de dimensao no parametro "FieldDR_C" da função ENconsumos ...' );
        end;
        consumos = zeros( N_junctions , 1 );
        consumos_ = [ 79.70 98.70 59.30 84.00 88.90 57.20 91.30 ...
            100.00 63.90 73.80 81.90 57.80 61.20 81.70];
        for ii = 1 : N_junctions;
            consumos(ii) = consumos_(ii);
        end;
        case 3; %%% Rotina de criação constante de um maximo de 14 consumos.
            error( 'Hipotese de type ainda nao definida na função ENconsumos ...' );
        otherwise;
            error( 'Erro no parametro type da função ENconsumos ...' );
        end;
    %%% End of function
    % End of function
    %%% Aceitam-se outras sugestões para este bloco. <=== %%%

```

A.12 Sub-rotina *ENcontinuidade_C.m*

```

% ENcontinuidade_C.m      (acerta a continuidade do consumo nos nos com o consumo dos reservatorios)
%
% Versão 0      05-Novembro-2003.

```

```

% Versão final 06-Novembro-2003.
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.
%
% Syntax: chrom_C = ENcontinuidade_C( chrom_C , prototipo_C );
%
% Parametros de "Input":
% chrom_C - cromossoma a transformar;
% prototipo_C -valores de consumo do prototipo.
%
% Parâmetros de "Output":
% chrom_C - cromossoma de saída acertado com o prototipo.

function chrom_C = ENcontinuidade_C( chrom_C , prototipo_C );

[individuos_C , N_junctions] = size(chrom_C);

QQ_P = 0; for ii = 1 : N_junctions;
    QQ_P = QQ_P + prototipo_C(ii);
end;

for jj = 1 : individuos_C;
    QQ_C = 0;
    for ii = 1 : N_junctions;
        QQ_C = QQ_C + chrom_C(jj,ii);
    end;
    if (QQ_C ~= QQ_P);

```



```

        chrom_C(jj,:) = chrom_C(jj,:) - (QQ_C - QQ_P) / N_junctions;
    end;
end;

% End of function

```

A.13 Sub-rotina *ENDdiametros.m*

```

% ENDdiametros.m      (define uma estrutura de diametros para o estudo genetico)
%
% Versão 0      12-Novembro-2003.
% Versão final  20-Novembro-2003.
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.
%
% Syntax:  error_code = ENDdiametros( type , FieldDR_D , nnn );
%
% Parametros de "Input":
% type      - tipo de diametros a definir;
%            1 - aleatorio;
%            2 - constante, definido previamente;
%            3 - função da distancia temporal (ainda nao definido);
%            etc.
% FieldDR_D - Estrutura de dados a criar;
% nnn       - distancia temporal.
%

```

```

% Parâmetros de "Output":
%   error_code      - indicação de funcionamento;
%                   0 - sem problemas.

function error_code = ENdiametros( type , FieldDR_D , nnn );

global EN_DIAMETER;

[nn , N_tubos] = size( FieldDR_D ); if (nn ~= 2);
    error( 'Erro na dimensao de FieldDR_D da função ENdiametros ...' );
end; diametros = zeros( N_tubos , 1 );

switch type;
case 1; %%%%%%%%%%%
%
    nn = (FieldDR_D(2,ii) + FieldDR_D(1,ii)) / 2;
    for ii = 1 : N_tubos;
        mm = rand*(FieldDR_D(2,ii)-FieldDR_D(1,ii))*1.1 + nn;
        while (mm < FieldDR_D(1,ii) | (mm > FieldDR_D(2,ii) ));
            mm = rand*(FieldDR_D(2,ii)-FieldDR_D(1,ii))*1.1+nn;
        end;
        mm = round( mm * 10 ) / 10;
        diametros(ii) = mm;
    end;
    if (ii ~= N_tubos + 1);
        error( 'Numero de atribuições de diametros nao consistente com os dados ...' );
    end;
%
case 2; %%%%%%%%%%%
%
    diametros_ = [ 250 200 250 200 200 200 200 200 ...
        250 250 250 150 150 250 300 300 200 200 150];
%
    for ii = 1 : N_tubos;
        diametros(ii) = diametros_(ii);
    end;
%
% Rotina de criação constante de um maximo de 22 diametros.
%
%
%
%

```



```

%
% Syntax:  ObjV = ENdistancia( type , prototipo , phenotipo );
%
% Parametros de "Input":
%   type           - tipo de avaliação (dimensional, adimensional, quadratica, ... etc);
%   prototipo      - prototipo a avaliar;
%   phenotipo      - phenotipo a avaliar.
%
% Parâmetros de "Output":
%   ObjV           - resultado de objectivos da linha de prototipo e phenotipo de dados.

function ObjV = ENdistancia( type , phenotipo , prototipo );

switch type;

    case 1;% Diferença dimensional
        ObjV = abs( prototipo - phenotipo );

    case 2;% Diferença dimensional quadratica
        ObjV = (prototipo - phenotipo)^2;

    case 3;% Diferença adimensional
        ObjV = abs( (prototipo - phenotipo) / prototipo );

    case 4;% Diferença adimensional quadratica
        ObjV = ( (prototipo - phenotipo ) / prototipo)^2;

        %%%casos cruzados%%

    case 5;% Diferença dimensional cruzada com adimensional
        ObjV = abs( prototipo - phenotipo ) + abs( (prototipo - phenotipo) / prototipo );

    case 6;% Diferença dimensional quadratica cruzada com adimensional quadratica
        ObjV = (prototipo - phenotipo)^2 + ( (prototipo - phenotipo ) / prototipo)^2;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% casos nao cruzados:

case 7;% Diferença dimensional quadratica mais dimensional;
ObjV = (prototipo - phenotipo)^2 + abs( prototipo - phenotipo );

case 8;% Diferença adimensional quadratica mais adimensional
ObjV = ( (prototipo - phenotipo ) / prototipo)^2 + abs( (prototipo - phenotipo) / prototipo );

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% type negativo:

otherwise;
if (type < 0);% Valores negativos de type correspondem a diferenças dimensionais de dimensao type;
    ObjV = (prototipo - phenotipo)^(-type);
else;
    error( 'Erro na variavel type da função ENdistancia ...' );
end;

end;

% End of function

```

A.15 Sub-rotina *ENelitismo.m*

```

% ENelitismo.m      (reinserir o melhor cromossoma anterior, mutado, em todos os caso de repetição de cromossomas)
%
% Versão 0      30-Setembro-2003.
% Versão final  26-Novembro-2003.
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,

```

```

% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.
%
% Syntax: chrom = ENelitismo( chrom , elemento);
%
% Parametros de "Input":
% chrom - populacao de cromossoma em causa;
% elemento - elemento a verificar integraçao;
%
% Parâmetros de "Output":
% chrom - cromossoma de saída, com elemento de elite eventualmente re-inserido.

function chrom = ENelitismo( chrom , elemento , FieldDR );

[Nind , Nvar] = size( chrom );

[BB , CC] = size( elemento );

if BB ~= 1;
    error( 'Erro nas dimensoes do dado "elemento" para a função ENelitismo ...' );
end; if (Nvar ~= CC);
    error( 'Erro nas dimensoes cruzadas da função ENelitismo ...' );
end;

for mm = 1 : (Nind - 1);
    AA = 0;
    for ii = (mm + 1) : Nind;
        CC = 0;
        BB = (chrom(ii,:) ~= chrom(mm,:));
        for jj = 1 : Nvar;
            CC = CC + BB(jj);
        end;
        if (CC == 0);
            AA = AA + 1;
        end;
    end;
end;

```

```

end;
if (CC == 0 & AA > 1);
    AAA = (1/Nvar);
    chrom(ii,:) = ENmutacao( chrom(ii,:), FieldDR , AAA );
    % chrom(ii,:) = mutbga( chrom(ii,:), FieldDR , [1/Nvar 1] );função com erro !!!!!!!!!!!!!
end;
end;
end;
% End of function

```

A.16 Sub-rotina *ENgenetico_C.m*

```

% ENgenetico_C.m      (progride uma geração de consumo nos nos na verificação da tese)
%
% Versão 0      24-Setembro-2003.
% Versão final  19-Novembro-2003.
%               20-Novembro-2003 (correção da função mutbga);
%               24-Novembro-2003 (redução da função a selecção e mutação);
%               27-Novembro-2003.
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.
%
% Syntax:  SelCh_C = ENgenetico_C( ObjV_C , chrom_C , FieldDR_C , prototipo_C );
%
% Parametros de "Input":

```

```

% ObjV_C      - listagem de objectivos da populacao;
% chrom_C     - cromossoma a transformar;
% FieldDR_C   - campo de expressao do cromossoma;
% prototipo_C -valores de consumo do prototipo.
%
% Parâmetros de "Output":
% chrom_C     - cromossoma de saida.

function SelCh_C = ENGenetico_C( ObjV_C , chrom_C , FieldDR_C ,
prototipo_C );

%relação de crossover para os consumos nos nós:
global XOVR_C;
%relação de mutação para os consumos nos nós:
global MUTR_C;

[Nind_C , N_junctions] = size( chrom_C ); [valor , ordem] = sort(
ObjV_C ); chrom_C(:, :) = chrom_C(orden(:),:); ObjV_C(:) =
valor(:);

BB_C = chrom_C(1,:);

FitnV_C = ranking( ObjV_C );

SelCh_C = select( 'rws' , chrom_C , FitnV_C , 0.9 );

% SelCh_C = mutbga( SelCh_C , FieldDR_C , [MUTR_C_ 1] ); FUNÇÃO COM ERRO
!!!!!!!!!!

SelCh_C = ENmutacao( SelCh_C , FieldDR_C , MUTR_C , ObjV_C );

% End of function

```


A.17 Sub-rotina *ENgenetico_R.m*

```
% ENgenetico_R.m      (progride uma geraçao de rugosidades, na verificacao da tese)
%
% Versão 0      24-Setembro-2003;
% Versão final  19-Novembro-2003;
%              20-Novembro-2003 (correçao da funçao mutbga);
%              24-Novembro-2003 (reduçao da funçao a seleccao e mutaçao);
%              27-Novembro-2003.
%
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.
%
%
% Syntax:  SelCh_R = ENgenetico( ObjV_R , chrom_R , FieldDR_R );
%
% Parametros de "Input":
%   ObjV_R   - listagem de objectivos da populaçao;
%   chrom_R  - cromossoma a transformar;
%   FieldDR_R - campo de expressao do cromossoma;
%
% Parâmetros de "Output":
%   SelCh_R  - cromossomas seleccionados para rugosidades de saida (seleccionados & mutados).

function SelCh_R = ENgenetico_R( ObjV_R , chrom_R , FieldDR_R );

%relação de crossover para as rugosidades
global XQVR_R;
%relação de mutação para as rugosidades
```

```

global MUTR_R;

[Nind_R , N_tubos] = size( chrom_R ); [valor , ordem] = sort(
ObjV_R ); chrom_R(:, :) = chrom_R(ordem(:),:); ObjV_R(:) =
valor(:);

BB_R = chrom_R(1,:);

FitnV_R = ranking( ObjV_R );

SelCh_R = select( 'rws' , chrom_R , FitnV_R , 0.9 );

%SelCh_R = recomb( 'recdis' , SelCh_R , XOV_R ); funcao colocada fora da subrotina <=====

%SelCh_R = mutbga( SelCh_R , FieldDR_R , [MUTR_R_ 1] ); FUNCAO COM ERRO !!!!!!!

SelCh_R = ENmutacao( SelCh_R , FieldDR_R , MUTR_R , ObjV_R );

% End of function

```

A.18 Sub-rotina *ENindices.m*

```

% ENindices.m      (determina os indices jj,ii, funcao da distancia unitaria ao momento presente)
%
% Versão 0      15-Outubro-2003.
% Versão final  15-Outubro-2003.
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,

```

```

% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.
%
% Syntax: [jj , ii] = ENindices( kk , Nssd );
%
% Parametros de "Input":
% kk - Distancia em causa;
% Nssd - Numero de simulacoes significativas diarias;
%
% Parâmetros de "Output":
% ii - dia;
% jj - simulacao do dia.

function [jj , ii] = ENindices( kk , Nssd );

ii = fix( kk / Nssd ) + 1; jj = mod( kk , Nssd ); if (jj == 0);
jj = Nssd;
ii = ii - 1;
end;

% End of function

```

A.19 Sub-rotina *ENmutacao.m*

```

% ENmutacao.m (função mutação que, por erro evidente de mutbga, e sua substitutiva)
%
% Versão 0 30-Setembro-2003.
% Versão final 26-Novembro-2003.
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
% Faculdade de Engenharia da

```

```

% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.
%
% Syntax: chrom_ = ENmutacao( chrom_ , FieldR_ , MUTR_ , ObjV_ );
%
% Parametros de "Input":
% chrom_ - populacao de cromossoma em causa;
% FieldR_ - bitola de valores para mutacao;
% MUTR_ - Constante de mutacao;
% ObjV_ - Vector de objectividades ja conhecidas e ordenadas
%
% Parâmetros de "Output":
% chrom_ - cromossoma de saida, com elemento de elite eventualmente re-inserido.

function chrom_ = ENmutacao( chrom_ , FieldR_ , MUTR_ , ObjV_ );

global N_tubos;

% funcao mutacao geral %%%%%%%%%%%
if (nargin == 4);
    factor_mut = ObjV_(1);
    MUTR_I_ = MUTR_ * factor_mut;
    if MUTR_I_ > MUTR_;
        MUTR_I_ = MUTR_;
    end;
else;
    if (nargin ~= 3);
        error( 'Parametros de entrada errados na funcao ENmutacao ...' );
    end;
    MUTR_I_ = MUTR_;
end;
%
% [Nind , AA] = size( chrom_ );

```

```

for ii = 1 : N_tubos;
    nn = (FieldDR_(2,ii) + FieldDR_(1,ii)) / 2;
    for jj = 1 : Nind;
        if (rand <= MUTR_I_);
            mm = ( rand*(FieldDR_(2,ii) - FieldDR_(1,ii)) ) * 1.1 + nn;
            while (mm < FieldDR_(1,ii) | (mm > FieldDR_(2,ii) ));
                mm = rand*(FieldDR_(2,ii)-FieldDR_(1,ii))*1.1+nn;
            end;
            chrom_(jj,ii) = mm;
        end;
    end;
end;
end;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% chrom(ii,:) = mutbga( chrom(ii,:) , FieldDR , [1/Nvar 1] );      !!!!!!!!!!! função com erro !!!!!!!!!!!
% End of function

```

A.20 Sub-rotina *ENordem.m*

```

% ENordem.m      (perante um chrom e uma ObjV (C ou R) correspondente, devolve o cromossoma e a ObjV ordenada crescente)
%
% Versão 0      26-Novembro-2003;
% Versão final  26-Novembro-2003.
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.

```

```

% Syntax: [ObjV , chrom] = ENordem( ObjV , chrom );
%
% Parametros de "Input":
%   ObjV      - vector coluna de ObjV em analise;
%   chrom     - 0 cromossoma a ordenar.
%
% Parâmetros de "Output":
%   ObjV      - vector coluna de ObjV ordenado de forma crescente;
%   chrom     - 0 cromossoma ordenado.
%
function [ObjV , chrom] = ENordem( ObjV , chrom );

[valor , ordem] = sort( ObjV ); chrom (:,:) = chrom(ordem(:,:),:);
ObjV(:) = valor(:);

% End of function

```

A.21 Sub-rotina *ENrugosidades.m*

```

% ENrugosidades.m      (define uma estrutura de rugosidades para um determinado prototipo)
%
% Versão 0      10-Novembro-2003.
% Versão final  10-Novembro-2003.
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.

```

```

%
% Syntax:  rugosidades = ENrugosidades( type , FieldDR_R , nnn );
%
% Parametros de "Input":
%   type
%       - tipo de consumo a definir;
%       1 - aleatorio;
%       2 - constante, definido previamente;
%       3 - função da distancia temporal (ainda nao definido);
%       etc.
%   FieldDR_R
%       - Estrutura de dados a criar;
%   nnn
%       - distancia temporal.
%
% Parâmetros de "Output":
%   rugosidades
%       - rugosidades de resultado;
%
function rugosidades = ENrugosidades( type , FieldDR_R , nnn );

switch type;
case 1; %%%%%%%%%%%%%%%
[nn , N_tubos] = size( FieldDR_R );
if (nn ~= 2);
    error( 'Erro na dimensao de FieldDR_R da função ENrugosidades ...' );
end;
%
rugosidades = zeros( N_tubos , 1 );
%
for ii = 1 : N_tubos;
    nn = (FieldDR_R(2,ii) + FieldDR_R(1,ii)) / 2;
    while (ii <= N_tubos);
        mm = rand*(FieldDR_R(2,ii)-FieldDR_R(1,ii))*1.1 + nn;
        while (mm < FieldDR_R(1,ii) | (mm > FieldDR_R(2,ii))); % de protótipo para rugosidades, consistente
            mm = rand*(FieldDR_R(2,ii)-FieldDR_R(1,ii))*1.1+nn; % com o espaço amostral de busca pelo AG (todos os
        end; % valores de intervalo, limites incluídos),
        mm = round( mm * 10 ) / 10; % aferindo aos dados uma precisão de decima de milimetro.
        % Estes valores podem alternativamente ser sugeridos através
        rugosidades(ii) = mm; % de uma variação assimilável a uma função contínua e
    end;
end;

```

```
% diferenciável, analisável em termos históricos através de
% uma análise de Fourier, ou estatística, de espectro, etc
end;
%
case 2;%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[nn , N_tubos] = size( FieldDR_R );
if (nn ~= 2);
    error( 'Erro de dimensao no parametro "FieldDR_R" da função ENrugosidades ...' );
end;
%
rugosidades = zeros( N_tubos , 1 );
rugosidades_ = [ 0.2 , 0.3 , 0.2 , 0.7 , 0.2 , 0.2 , 0.3 , 0.2 , 0.9 , 0.2 , 0.3 , 0.2 , 1.0 , 0.7 , 0.3 , 0.2 , ...
0.3 , 0.2 , 0.5 , 0.2 , 0.3 , 0.2 ];
for ii = 1 : N_tubos;
    rugosidades(ii) = rugosidades_(ii);
end;
%
case 3;%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
error( 'Hipotese de type ainda nao definida na função ENrugosidades ...' );
otherwise;
    error( 'Erro no parametro type da função ENrugosidades ...' );
end;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
===== Aceitam-se outras sugestões para este bloco. <==== %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

A.22 Sub-rotina *ENtempo.m*

```
% ENtempo.m          ("retriva" o tempo para display)
%
% Versão 0           13-Setembro-2003.
% Versão final      20-Janeiro-2004.
%
% Autor: André Vieira
```

A.22 Sub-routine *ENtempo.m*


```

% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.
%
% Syntax:  ENtempo = ENtempo( tempo );
%
% Parametros de "Input":
%      tempo      - tempo (em segundos);
%
% Parâmetros de "Output":
%      ENtempo    - valor da variável tempo em forma de "display".

function ENtempo = ENtempo( tempo );

tempo_ = tempo; field = 's';

tempo_ = tempo_ / 60; if fix( tempo_ ) > 0;
    field = 'm:s';
end; tempo_ = tempo_ / 60; if fix( tempo_ ) > 0;
    field = 'h:m:s';
end; tempo_ = tempo_ / 24;

if fix( tempo_ ) > 0;
    field = 'd:h:m';
end; tempo_ = tempo_ / 365; if fix( tempo_ ) > 0;
    field = 'a:d:h';
end;

switch field;

```

```

case 's';

    segundos = round( tempo * 100 ) / 100;

    ENtempo = [num2str(segundos) , ' (segundos).'];

case 'm:s';

    tempo = tempo/60;
    minutos = fix( tempo );
    tempo = (tempo - minutos) * 60;
    segundos = round( tempo * 100 ) / 100;

    ENtempo = [num2str(minutos) , ' : ' , num2str(segundos) , ' (m:s).'];

case 'h:m:s';

    tempo = tempo/60/60;
    horas = fix( tempo );
    tempo = (tempo - horas) * 60;
    minutos = fix( tempo );
    tempo = (tempo - minutos) * 60;
    segundos = round( tempo * 100 ) / 100;

    ENtempo = [num2str(horas) , ' : ' , num2str(minutos) , ' : ' , num2str(segundos) , ' (h:m:s). '];

case 'd:h:m';

    tempo = tempo/24/60/60;
    dias = fix( tempo );
    tempo = (tempo - dias) * 24;
    horas = fix( tempo );
    tempo = (tempo - horas) * 60;
    minutos = round( tempo * 100 ) / 100;

```

```

ENtempo = [num2str(dias), ' : ', num2str(horas), ...
           ', ', num2str(minutos), ' (d:h:m). '];

case 'a:d:h';

    tempo = tempo/365/24/60/60;
    anos = fix( tempo );
    tempo = (tempo - anos) * 365;
    dias = fix( tempo );
    tempo = (tempo - dias) * 24;
    horas = round( tempo * 100 ) / 100;

    ENtempo = [num2str(anos), ' : ', num2str(dias), ' : ', ...
              num2str(horas), ' (anos:dias:h). '];

end;

% End of function

```


Apêndice B

Matlab/Epanet2 DLL Link

```
% EPANET Programmer's Toolkit. Simulador para sistemas de abastecimento de
% água da EPA, "Environmental Protection Agency", do Governo dos Estados
% Unidos da América.
%
%% Versão 0      07-Agosto-2003.
%% Versão final 29-Agosto-2003.
%
% Autor: André Vieira
% E-mail: <aacvieira@aeiou.pt>;
% E-mail: <aacvieira@mail.pt>.
%
% Faculdade de Engenharia da
% Universidade do Porto,
% Rua Dr. Roberto Frias,
% 4200-465 PORTO
% PORTUGAL.
%
% A - LISTAGEM DAS FUNCOES DO EPANET:
%
%% Corrida completa de uma simulação através de um comando em estilo de linha.
%% ENepanet - Corre uma simulação completa do EPANET (não disponível "linkagem" ao Matlab)
%
%% Abertura e fecho do sistema de Toolkit do EPANET
%% ENopen
%% ENCclose
%
%% Recuperação de informação sobre ligações de rede
%% ENgetlinkindex
%% ENgetlinkid
%% ENgetlinktype
%% ENgetlinknodes
```

```

% ENgetlinkvalue
%
% Recuperação de informação sobre padrões temporais
% ENgetpatternid
% ENgetpatternindex
% ENgetpatternlen
% ENgetpatternvalue
%
% Recuperação de outras informações da rede
% ENgetcontrol
% ENgetcount
% ENgetflowunits
% ENgettimeparam
% ENgetqualitytype
% ENgetoption
% ENgetversion
% ENwriteline (função sem definição de sintaxe no actual "help" do Epanet Toolkit)
%
% Colocar novos valores nos parâmetros da rede
% ENsetcontrol
% ENsetnodevalue
% ENsetlinkvalue
% ENsetpattern
% ENsetpatternvalue
% ENsetqualitytype
% ENsettimeparam
% ENsetoption
%
% Gravação e uso dos ficheiros de análise hidráulica resultante
% ENsavehydfile
% ENusehydfile
%
% Corrida de uma análise hidráulica
% ENSolveH
% ENopenH

```



```

% [int32, int32Ref] ENnextH(int32Ref)
% int32 ENcloseH
% [int32, string] ENSaveHydfile(string)
% [int32, string] ENuseHydfile(string)
% int32 ENSolveQ
% int32 ENopenQ
% int32 ENinitQ(int32)
% [int32, int32Ref] ENrunQ(int32Ref)
% [int32, int32Ref] ENnextQ(int32Ref)
% [int32, int32Ref] ENstepQ(int32Ref)
% int32 ENcloseQ
% [int32, string] ENwriteline(string)
% int32 ENreport
% int32 ENresetreport
% [int32, string] ENsetreport(string)
% [int32, int32Ref, int32Ref, singleRef, int32Ref, singleRef] ENgetcontrol(int32, int32Ref, ...
% int32Ref, singleRef, int32Ref, singleRef)
% [int32, int32Ref] ENgetcount(int32, int32Ref)
% [int32, singleRef] ENgetoption(int32, singleRef)
% [int32, int32Ref] ENgettimeparam(int32, int32Ref)
% [int32, int32Ref] ENgetflowunits(int32Ref)
% [int32, string, int32Ref] ENgetpatternindex(string, int32Ref)
% [int32, string] ENgetpatternid(int32, string)
% [int32, int32Ref] ENgetpatternlen(int32, int32Ref)
% [int32, singleRef] ENgetpatternvalue(int32, int32, singleRef)
% [int32, int32Ref, int32Ref] ENgetquality(int32Ref, int32Ref)
% [int32, string] ENgeterror(int32, string, int32)
% [int32, string, int32Ref] ENgetnodeindex(string, int32Ref)
% [int32, string] ENgetnodeid(int32, string)
% [int32, int32Ref] ENgetnodetype(int32, int32Ref)
% [int32, singleRef] ENgetnodevalue(int32, int32, singleRef)
% [int32, string, int32Ref] ENgetlinkindex(string, int32Ref)
% [int32, string] ENgetlinkid(int32, string)
% [int32, int32Ref] ENgetlinktype(int32, int32Ref)
% [int32, int32Ref, int32Ref] ENgetlinknodes(int32, int32Ref, int32Ref)

```

```

% [int32, singleRef] ENgetlinkvalue(int32, int32, singleRef)
% [int32, int32Ref] ENgetversion(int32Ref)
% int32 ENsetcontrol(int32, int32, int32, single, int32, single)
% int32 ENsetnodevalue(int32, int32, single)
% int32 ENsetlinkvalue(int32, int32, single)
% [int32, singleRef] ENsetpattern(int32, singleRef, int32)
% int32 ENsetpatternvalue(int32, int32, single)
% int32 ENsettimeparam(int32, int32)
% int32 ENsetoption(int32, single)
% int32 ENsetstatusreport(int32)
% [int32, string, string, string] ENsetqualitytype(int32, string, string, string)

```

Índice remissivo

- água
 - comportamento, 17
 - definição para a qualidade, 43
 - viscosidade, 17
- Discrete Volume Method*, 47
- EPANET*, 105
- habitat*, 92
- jar test*, 44
- algoritmo genético
 - alelo*, 66
 - cromossoma*, 66
 - crossover*, 65
 - mutação*, 66
 - adequação, 70
 - álgebra da adequação, 70
 - avaliação, 65, 70
 - canónico, 67
 - codificação, 67
 - definição, 66
 - descodificação, 68
 - descodificação/avaliação, 67
 - implementação, 69
 - multiplicação, 65
 - população, 65
 - população multi-espécie, 93
 - selecção, 65
 - sobrevivência, 69
 - soluções por enumeração completa, 69
- Algoritmo Genético Simples, 70
- análise de sensibilidade, 82
- análise de traços, 43
- ausência de condutibilidade, 17
- calibração
 - mecanismo, 96
- calibração de modelos matemáticos
 - definição, 52
- camada limite, 17
- caudais externos
 - convenção de sinais, 40
- cavitação, 8
- choque hidráulico
 - propagação, 12
- codificação
 - elementos da rede, 101
- coeficiente
 - compressibilidade, 11
 - correlação, 81
 - elasticidade de volume, 11
 - resistência, 30
 - viscosidade absoluta, 16
 - viscosidade cinemática, 16
 - viscosidade dinâmica, 16
 - viscosidade relativo, 16
- coesão
 - definição, 18
 - manifestações, 18
- compressibilidade
 - coeficiente de, 9
 - valor de coeficiente, 11
- configuração mínima de energia, 18
- consumos
 - capitação, 79
 - população presente, 79
 - variabilidade anual, 79
 - variabilidade diária, 79
 - variabilidade semanal, 79
- cromossoma, 69
- decaimento
 - definição, 21, 43
 - simulação, 43
- decaimento central, 45
- decaimento em tubagens
 - bulk decay*, 22
 - wall decay*, 22
- densidade
 - definição, 8
- difusibilidade, 45
 - definição, 21
- distinção entre líquidos e gases, 11
- distribuição estatística, 76
- equilíbrio de redes, 19
- escoamento

- definição, 22
- exterior, 23
- interior, 23
- não permanente, 23
- permanente uniforme, 23
- permanente variado, 23
- sob pressão, 23
- superfície livre, 23
- superfície livre, 23
- esfera de actividade molecular, 18
- evaporação, 18
- fórmula
 - Pearson tipo III*, 77
 - Colebrook-White, 31
 - Darcy-Weisbach, 29
 - Hazen-Williams, 31
- fenómenos capilares, 19
- fluido newtoniano
 - definição, 15
- fluidos
 - comportamento, 7
 - definição, 7
- fluidos ideais, 17
- fluidos perfeitos, 17
- função
 - Gama*, 77
- genótipo, 69
- inter-relacionamento
 - decaimento central, 45
 - decaimento de parede, 45
- isotropia
 - definição, 8
- lei de Dalton, 20
 - definição, 20
- lei de Henry, 20
- máscara
 - amostragem, 175
- método dos nós, 33
- módulo cinemático de elasticidade de volume, 12
- módulo de elasticidade de volume, 11
- massa
 - definição, 8
- massa específica
 - definição, 8
 - expressão, 9
- massa volúmica
 - definição, 8
- mca
 - definição, 14
- mecânica dos fluidos
 - variáveis, 26
- modelação da qualidade, 43
- momentos de distribuição, 62
- movimento activo, 44
- número de Reynolds, 30
- ondas elásticas
 - propagação, 21
- optimização
 - algoritmos genéticos, 56
 - enumeração parcial, 55
 - método dos mínimos quadrados, 56
 - por busca, 56
 - programação linear, 55
 - programação não linear, 56
 - tentativa e erro, 55
- perfil de velocidades, 44
- peso
 - definição, 8
- peso específico
 - definição, 8
- peso volúmico
 - definição, 8
- polinómio de minimização quadrático, 63
- princípio da minimização da energia, 18
- propagação do som, 21
- recta de mínimos quadrados, 63
- rede de distribuição de água
 - definição, 35
- redes
 - emalhadas, 42
 - ramificadas, 42
- regime
 - permanente variado, 24
- regime não uniforme
 - extremidades, 24
- regime uniforme, 23
- regimes de escoamento, 25
- rugosidade
 - artificial, 30
- solubilidade
 - coeficiente, 20
 - definição, 20
- sub-pressão, 19

- substâncias plásticas
 - definição, 7
- superfície de catálise, 44
- temperatura
 - Poiseuille, 16
- tensão de saturação de vapor, 19
- tensão de vapor
 - definição, 19
- tensão superficial, 19
 - adesão, 19
- teste da garrafa, 44
- troços de transição
 - secção circular, 24
- variável aleatória, 76
- viscosidade
 - definição, 14
- viscosidade newtoniana, 17
- volume saturado
 - definição, 19

Bibliografia

- [1] Master's thesis.
- [2] A. J. Abebe and D. P. Solomatine. Application of global optimization to the design of pipe networks. In *Proc. 3rd International Conference on Hydroinformatics*, Copenhagen, August 1998.
- [3] R. F Dias Agudo. *Introdução à Geometria Analítica*, volume 1. Livraria Escolar Editora, Rua da Escola Politécnica, 80-A, Lisboa, 1978.
- [4] R. F Dias Agudo. *Introdução à Geometria Analítica*, volume 2. Livraria Escolar Editora, Rua da Escola Politécnica, 80-A, Lisboa, 1978.
- [5] M. H. Alegre. Modelação de redes de distribuição de Água de abastecimento. Guia de utilização, LNEC, Lisboa, 1990.
- [6] J. M. Alonso, F. Alvarruiz, D. Guerrero, V. Hernández, P. A. Ruiz, A. M. Vidal, F. Martínez, J. Vercher, and B. Ulanicki. Parallel computing in water network analysis and leakage minimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE , 126(4):251–260, 2000.
- [7] T. Altman and P. F. Boulos. Solving flow constrained networks: Inverse problem. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 121(5):427–431, 1995.
- [8] J. H. Andersen and R. S. Powell. Simulation of water networks containing controlling elements. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 125(3):162–169, 1999.
- [9] J. H. Andersen, R. S. Powell, and J. F. Marsh. Constrained state estimation with applications in water distribution network monitoring. *International Journal of Systems Science*, Taylor & Francis, 32(6):807–816, 2001.
- [10] T. M. Apostol. *CALCULUS Volume II - Multi Variable Calculus and Linear Algebra, with Applications to Differential Equations and Probability*, volume 2. John-Wiley & Sons, USA, 2 edition, 1968.
- [11] F. I. Arreguín-Cortes and L. H. Ochoa-Alejo. Evaluation of water losses in distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 123(5):284–291, 1997.
- [12] E. Atrek. Virtual loads in response sensitivity analysis. In *6th. Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*, volume AIAA-96-4173-CP, Bellevue, Washington, 4-6, Setembro, 1996. AIAA/NASA/ISSMO.

- [13] E. Atrek. The virtual load method for the response sensitivity analysis of nonlinear structures modelled by finite elements. In *3rd IS-SMO/UBCAD/UB/AIAA, World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*. WCSMO-3, May, 17-21, Buffalo, New York 1999.
- [14] D. H. Axworthy and B. W. Karney. Modeling low velocity/high dispersion flow in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 122(3):218–211, 1996.
- [15] V. Babovic and M. Keijzer. Evolutionary algorithms approach to induction of differential equations. In *Proc. 4th International Conference on Hydroinformatics*, Iowa City, July 2000.
- [16] Y. Bao and L. W. Mays. Model for water distribution system reliability. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 116(9):1.119–1.137, 1990.
- [17] A. Bargiela and G. D. Hainsworth. Pressure and flow uncertainty in water systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 115(2):212–229, 1989.
- [18] A. Bascià and T. Tucciarelli. Simultaneous zonation and calibration of pipe network parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 129(5):394–403, 2003.
- [19] J. Baxter. A model of inductive bias learning. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 12:149–198, 2000.
- [20] A. Bergant, A.R. Simpson, and J. Vítkovský. Developments in unsteady pipe flow friction modeling. *Journal of Hydraulic Research*, 39(3):249–257, 2001.
- [21] B. Bhattacharya, A. H. Lobrecht, and D. P. Solomatine. Neural networks and reinforcement learning in control of water systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 129(6):458–465, 2003.
- [22] P. R. Bhave. Noncomputer optimization of single-source networks. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 104(4):799–814, 1978.
- [23] P. R. Bhave. Calibrating water distribution network models. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 114(1):120–136, 1988.
- [24] P. R. Bhave. Extended period simulation of water systems - direct solution. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 114(5):1.146–1159, 1988.
- [25] P. R. Bhave. Node flow analysis of water distribution systems. *Transportation Engineering Journal*, ASCE, 107(4):457–467, 1988.
- [26] Pramod R. Bhave. *Analysis of Flow in Water Distribution Networks*. Technomic Publishing, Co, USA, 1991.
- [27] R. B. Billings and D. E. Agthe. State space versus multiple regression for forecasting urban water demand. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 124(2):113–117, 1998.

- [28] H. Blockeel, L. Dehaspe, B. Demoen, G. Janssens, J. Ramon, and H. Vandecasteele. Improving the efficiency of inductive logic programming through the use of query packs. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 16:135–166, 2002.
- [29] D. L. Boccelli, M. E. Tryby, J. G. Uber, L. A. Rossman, M. L. Zierolf, and M. M. Polycarpou. Optimal scheduling of booster disinfection in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 124(2):99–111, 1998. errata in JWRPM, Set./Out. 1998, pag. 300.
- [30] P. Boulos and L.E. Ormsbee. Explicit network calibration for multiple loading conditions. *Civil Engineering Systems*, 8:153–159, 1991.
- [31] P. F. Boulos. Numerical methods for modeling water quality in distribution systems: A comparison. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 122(2):137–146, 1996.
- [32] P. F. Boulos, T. Altman, P. A. Jarrige, and F. Collevati. Discrete simulation approach for network water quality models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 121(1):49–60, 1995.
- [33] P. F. Boulos and D. J. Wood. Explicit calibration of pipe-network parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 116(11):1.329–1.344, 1990.
- [34] C. Boutilier, T. Dean, and S. Hanks. Decision-theoretic planning: Structural assumptions and computational leverage. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 11:1–94, 1999.
- [35] B. Brunone and M. Ferrante. Detecting leaks in pressurized pipes by means of transients. *Journal of Hydraulic Research*, 39(4):1–9, 2001.
- [36] S. G. Buchberger, K. Lansey, and J. G. Uber. Editor’s note. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE:117, Julho/Agosto 2000.
- [37] S. G. Buchberger and G. J. Well. Intensity, duration, and frequency of residential water demands. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 122(1):11–19, 1996.
- [38] C.A. Bush and J. G. Uber. Sampling design methods for water distribution model calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 124(6):334–344, 1998.
- [39] J. E. Campbell, D. A. Briggs, R. A. Denton, and G. Gartrell. Water quality operation with a blending reservoir and variable sources. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 128(4):288–302, 2002.
- [40] X-R. Cao and Y-W. Wan. Algorithms for sensitivity analysis of markov systems through potentials and perturbation realization. In *Transactions on Control Systems Technology*, volume 6(4). IEEE, Julho 1998.
- [41] R. G. Cembrowicz and J. J. Harrington. Capital-cost minimization of hydraulic network. *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, 99(3):431–440, 1973.
- [42] M. Chandrashekar and K. H. Stewart. Sparsity oriented analysis of large pipe networks. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 101(4):341–355, 1975.

- [43] Y-W. Chen and G. H. Tzeng. Fuzzy multi-objective approach to the supply chain model. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2(3):220–228, 2000.
- [44] A. Chipperfield, P. Fleming, H. Pohlheim, and C. Fonseca. *Genetic Algorithm TOOLBOX for Use with MATLAB*. Department of Automatic Control and Systems Engineering, University of Sheffield, England, version 1.2 edition, 1994.
- [45] V. T. Chow. *Open-Channel Hydraulics*. Civil Engineering. McGraw Hill International Editions, 1973.
- [46] V. T. Chow, D. R. Maidment, and L. W. Mays. *Applied Hydrology*. Civil Engineering. McGraw Hill International Editions, 1988.
- [47] R. M. Clark. Chlorine demand and tthm formation kinetics: A second-order model. *Journal of Environmental Engineering Division*, ASCE, 124(1):16–24, 1998.
- [48] R. M. Clark, W. M. Grayman, J. A. Goodrich, R. A. Deininger, and K. Skov. Measuring and modelling chlorine propagation in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 120(6):871–887, 1994.
- [49] R. M. Clark, W. M. Grayman, and R. M. Males. Contaminant propagation in distribution systems. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 114(4):929–943, 1988.
- [50] R. M. Clark, W. M. Grayman, R. M. Males, and A. F. Hess. Modelling contaminant propagation in drinking water distribution systems. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 119(2):349–364, 1993.
- [51] R. M. Clark, L. A. Rossman, and L. J. Wymer. Modelling distribution system water quality: Regulatory implications. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 121(6):423–428, 1995.
- [52] R. M. Clark and M. Sivaganesan. Predicting chlorine residuals in drinking water: Second order model. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 128(2):152–161, 2002.
- [53] W. W. Cohen. Pac-learning recursive logic programs: Efficient algorithms. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2:501–539, 1995.
- [54] W. W. Cohen. Pac-learning recursive logic programs: Negative results. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2:541–573, 1995.
- [55] S. Constants, B. Brémond, and P. Morel. Simulation and control of chlorine levels in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 129(3):135–145, 2003.
- [56] B. Coulbeck. An application of hierarchical optimization in calibration of large scale water networks. *Optimal Control Applications & Methods*, John Wiley & Sons, 6:31–42, 1985.
- [57] L-J. Cui and G. Kuczera. Optimizing urban water supply headworks using probabilistic search methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 129(5):380–387, 2003.

- [58] M. J. Culliname, K. E. Lansey, and L. W. Mays. Optimization-availability-based design of water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 118(3):420–441, 1992.
- [59] M. C. Cunha and J. Sousa. Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 125(4):215–221, 1999.
- [60] P. Dagnelie. *ESTATÍSTICA, Teoria e métodos*, volume 1. Publicações Europa América, Mem Martins, Portugal, 2 edition, 1973.
- [61] G. C. Dandy and M. Engelhardt. Optimal scheduling of water pipe replacement using genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 127(4):214–223, 2001.
- [62] R. S. N. Datta and K. Sridharan. Parameter estimation in water-distribution systems by least squares. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 120(4):405–422, 1994.
- [63] Lawrence Davis, editor. *Handbook of Genetic Algorithms*. Van Nostrand Reinhold, 115, Fifth Avenue, New York, 1991.
- [64] I. De Falco, A. Della Cioppa, and E. Tarantino. Discovering interesting classification rules with genetic programming. *Applied Soft Computing*, Elsevier, 1:257–269, 2002.
- [65] I. De Falco, A. Della Cioppa, and E. Tarantino. Mutation based genetic algorithm: Performance evaluation. *Applied Soft Computing*, Elsevier, 1:285–299, 2002.
- [66] Secretaria de Política Urbana. PROJECTO DE MODERNIZAÇÃO DO SECTOR SANEAMENTO - PMSS, série modernização do sector saneamento. Relatórios de fundamentação 1-15, Ministério do Planeamento e Orçamento do Governo Federal do Brasil, Brasília, Brasil, 1995-98.
- [67] A. K. Deb. Optimization in design of pumping systems. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 104(1):127–136, 1978.
- [68] A. K. Deb and A. K. Sarkar. Optimization in design of hydraulic network. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, ASCE, 97(2):141–158, 1971.
- [69] Y. B. Dibike. Developing generic hydrodynamic models using artificial neural networks. *Journal of Hydraulic Research*, 40(2):183–190, 2002.
- [70] J. J. Dinkel, G. A. Kochenberger, and S. N. Wong. Sensitivity analysis procedures for geometric programs: Computational aspects. *Transactions on Mathematical Software*, ACM, 4(1):1–14, 1978.
- [71] T. Y. Doh, J. H. Moon, K. B. Jin, and M. J. Chung. Robust iterative learning control with current feedback for uncertain linear systems. *International Journal of Systems Science*, 30(1):39–47, 1999.
- [72] R. P. Donachie. Digital program for water network analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 100(3):393–403, 1974.

- [73] M. Driels. Design of pressure transient control system. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 101(5):437–447, 1975.
- [74] N. Duan and L. W. Mays. Reliability analysis of pumping systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 116(2):230–248, 1990.
- [75] T. Dubrovin, A. Jolma, and E. Turunen. Fuzzy model for real time reservoir operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 128(1):66–73, 2002.
- [76] L. Ekenberg. A survey of decision analysis. saber endereço e mais informações, –Saber ano–.
- [77] R. Epp and A. G. Fowler. Efficient code for steady-state flows in networks. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 96(1):43–56, 1970.
- [78] M. M. Eusuff and K. E. Lansey. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 129(3):210–225, 2003.
- [79] Brunone B. Ferrante, M. Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady state tests 2. wavelet analysis. *Advances in Water Resources*, Elsevier, 26:107–116, 2003.
- [80] M. Ferrante and B. Brunone. Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady state tests. 1. harmonic analysis. *Advances in Water Resources*, Elsevier, 26:95–105, 2003.
- [81] G. B. Ferreri, Napoli E., and A. Tumbiolo. Calibration of roughness in water distribution networks. *Proc. 2nd International Conference on Water Pipeline Systems, Edinburg, UK, D. S. Miller (Ed)*, 1:379–396, 1994.
- [82] E. Fiesler and R. Beale, editors. *Handbook of Evolutionary Computation*. IOP Publishing Ltd and Oxford University Press, Oxford, release 97/1 edition, 1997.
- [83] E. Fiesler and R. Beale, editors. *Handbook of Neural Computation*. IOP Publishing Ltd and Oxford University Press, 1997.
- [84] V. L. Freedman and M. Ibaraki. Coupled reactive mass transport and fluid flow: Issues in model verification. *Advances in Water Resources*, Elsevier, 26:117–127, 2003.
- [85] O. Fujiwara and A. U. De Silva. Algorithm for reliability based optimal design of water networks. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 116(3):575–587, 1990.
- [86] B. Gabrys and A. Bargiela. Neural networks based decision support in presence of uncertainties. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 125(5):272–280, 1999.
- [87] C. R. Gagnon and S. L. S. Jacoby. Computer simulation of water distribution networks. *Transportation Engineering Journal*, ASCE, 101(3):553–567, 1975.
- [88] E. Gofman and M. Rodeh. Loop equations with unknown pipe characteristics. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 107(9):1.047–1.060, 1981.

- [89] D. E. Goldberg and C. H. Kuo. Genetic algorithms in pipeline optimization. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, 1(2):128–141, 1987.
- [90] D. F. Gordon. Asimovian adaptive agents. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 13:95–153, 2000.
- [91] I. C. Goulter and F. Bouchart. Reliability-constrained pipe network model. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 116(2):211–229, 1990.
- [92] I. C. Goulter and A. V. Coals. Quantitative approaches to reliability assessment in pipe networks. *Journal of the Transportation Engineering*, ASCE, 112(3):287–301, 1986.
- [93] W. M. Grayman, R. M. Clark, and R. M. Males. Modeling distribution system water quality: Dynamic approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 114(3):295–312, 1988.
- [94] M. Greco and G. Del Giudice. New approach to water distribution network calibration. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125(8):849–854, 1999.
- [95] H. R. Grooms. Algorithm for matrix bandwidth reduction. *Journal of the Structural Division*, ASCE, 98(1):203–214, 1972.
- [96] R. Gupta and P. R. Bhawe. Reliability analysis of water distribution systems. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 120(2):447–460, 1994.
- [97] R. Gupta and P. R. Bhawe. Reliability based design of water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 122(1):51–54, 1996.
- [98] R. Gupta and P. R. Bhawe. Comparison of methods for predicting deficient-network performance. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 122(3):214–217, 1996.
- [99] D. Halhal, G. A. Walters, D. Ouazar, and D. A. Savic. Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 123(3):137–146, 1997.
- [100] N. B. Hallam, F. Hua, J. R. West, C. F. Forster, and J. Simms. Bulk decay of chlorine in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 129(1):78–81, 2003.
- [101] B. L. Harding and T. M. Walski. Long time series simulation of water quality in distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 126(4):199–209, 2000.
- [102] F. L. Hart, W. A. Wheller, and W. J. Daly. Chlorine residual distribution in a municipal water network. In *Computer Symposium*. NEWWA, Setembro 1992.
- [103] C. Homwongs, T. Sastri, and J. W. Foster III. Adaptive forecasting of hourly municipal water consumption. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 120(6):888–905, 1994.

- [104] R. J. Houghtalen and J. Loftis. Improving water delivery system operation using training simulators. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 115(5):616–629, 1989.
- [105] L. T. Isaacs and K. G. Mills. Linear theory methods for pipe network analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 106(7):1.191–1201, 1980.
- [106] M. R. Islam and M. H. Chaudhry. Numerical solution of transport equations for applications in environmental hydraulics and hydrology. *Journal of Hydrology*, Elsevier, 191:106–121, 1997.
- [107] M. R. Islam and M. H. Chaudhry. Modelling of constituent transport in unsteady flows in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 124(11):1.115–1.124, 1998.
- [108] S. Iwamoto. Fuzzy decision-making through three dynamic programming approaches. *International Journal of Fuzzy Systems*, 3(4):520–526, 2001.
- [109] S. L. S. Jacoby. Design of optimal hydraulic networks. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 94(3):641–661, 1968.
- [110] A. K. Jain, D. M. Mohan, and P. Khanna. Modified Hazen-Williams formula. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 104(1):137–146, 1978.
- [111] R. W. Jeppson. Equivalent hydraulic pipe for parallel pipes. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 108(1):35–45, 1982.
- [112] R. W. Jeppson and A. L. Davis. Pressure reducing valves in pipe network analyses. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 102(7):987–1.001, 1976.
- [113] R. W. Jeppson and A. Tavallaei. Pumps and reservoirs in networks by linear theory. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 101(3):576–580, 1975.
- [114] L. P. Kaelbling, L. M. Littman, and A. W. Moore. Reinforcement learning: A survey. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 4:237–285, 1996.
- [115] J. P. Kaipio, V. Kolehmainen, Somersalo E., and M. Vauhkonen. Statistical inversion and monte carlo sampling methods in electrical impedance tomography. *Inverse Problems*, 16(5):1.487–1522, 2000.
- [116] Z. S. Kapeland, D. A. Savic, and G. A. Walters. Multi-objective sampling design for water distribution model calibration. Center for Water Systems, Department of Engineering, School of Engineering and Computer Science, University of Exeter, North Park Road, UK, 2002.
- [117] Z. S. Kapeland, D. A. Savic, and G. A. Walters. Multi-objective sampling design for water distribution model calibration. In *3rd International Conference on Environmental Management*, South Africa, 27-30 de Agosto 2002.
- [118] A. Karnib, J. Al-Hajjar, and D. Boissier. An expert system to evaluate the sensitivity of urban areas to the functioning failure of storm drainage networks. *Urban Water*, 4:43–51, 2002.

- [119] H. K. Kesavan and M. Chandrashekar. Graph-theoretic models for pipe network analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 98(2):345–364, 1972.
- [120] Y. Kleiner, B. J. Adams, and J. S. Rogers. Water distribution network renewal planning. *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, 15(1):15–26, 2001.
- [121] C. F. Lam and M. L. Wolla. Computer analysis of water distribution systems: Part I - formulation of equations. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 98(2):335–344, 1972.
- [122] K. E. Lansey and C. Basnet. Parameter estimation for water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 117(1):126–144, 1991.
- [123] K. E. Lansey, N. Duan, L. W. Mays, and Y. K. Tung. Water distribution systems design under uncertainties. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 115(5):630–645, 1989.
- [124] K. E. Lansey, W. El Shorbagy, I. Ahmed, J. Araújo, and C. T. Haan. Calibration assessment and data collection for water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 127(4):270–279, 2001.
- [125] C. L. Lawson and R. J. Hanson. *Solving Least Squares Problems*. Prentice Hall Series in Automatic Computation. Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1974.
- [126] B. H. Lee and R. A. Deninger. Optimal locations of monitoring stations in water distribution system. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 118(1):4–16, 1992.
- [127] J. R. Leis and M. A. Kramer. The simultaneous solution and sensitivity analysis of systems described by ordinary differential equations. *Transactions on Mathematical Software*, ACM, 14(1):45–60, 1988.
- [128] A. C. Lemer. Infrastructure obsolescence and design service life. *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, 2(4):153–161, 1996.
- [129] A. C. Lemer. closure infrastructure obsolescence and design service life. *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE:127–127, Setembro 1997.
- [130] P. F. Lemieux. Efficient algorithm for distribution networks. *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, 98(11):1911–1920, 1972. Discussão por Uri Shamir, JHD, ASCE 99(8), 1281–1283, 1973.
- [131] C. León, S. Martin, J. M. Elena, and J. Luque. EXPLORE hybrid expert system for water networks management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 126(2):65–74, 2000.
- [132] A. Lencastre. *Hidráulica Geral*. o autor, Lisboa, 1996.
- [133] A. Lencastre and F. M. Franco. *Lições de Hidrologia*. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, Portugal, 1984.

- [134] T. Liang. Design conduit system by dynamic programming. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 97(3):383–393, 1971.
- [135] J. A. Liggett and L-C. Chen. Inverse transient analysis in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 120(8):934–955, 1994.
- [136] S. Lingireddy, D. J. Wood, and A. Nelson. Modified pipe network model for incorporating peak demand requirements. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 124(5):296–299, 1998.
- [137] D. J. Litman. Cue phrase classification using machine learning. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 5:53–94, 1996.
- [138] K. W. Little and B. J. McCrodden. Minimization of raw water pumping costs using MILP. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 115(4):511–522, 1989.
- [139] H. Liu. Bernoulli equations with noninertial references. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Technical Notes, 101(3):580–585, 1975.
- [140] H. A. Loaiciga, R. J. Charbeneau, L. G. Everett, G. E. Fogg, B. F. Hobbs, and S. Rouhani. Review of ground water quality monitoring network design. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 118(1):11–37, 1992.
- [141] G. V. Loganatham, J. J. Greene, and T. J. Ahn. Design heuristic for globally minimum cost water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 121(2):182–192, 1995.
- [142] H. R. Maier, A. R. Simpson, A. C. Zecchin, W. K. Foong, K. Y. Phang, H. Y. Seah, and C. L. Tan. Ant colony optimization for design of water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 129(3):200–209, 2003.
- [143] C. K. Makropoulos, D. Butler, and C. Maksimovic. Fuzzy logic spatial decision support system for urban water management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 129(1):69–77, 2003.
- [144] R. M. Males, R. M. Cark, P. J. Wehrman, and W. E. Gates. Algorithm for mixing problems in water systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 111(2):206–219, 1985.
- [145] R. M. Males, W. M. Grayman, and R. M. Clark. Modeling water quality in distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 114(2):197–209, 1988.
- [146] T. A. Marlow, R. L. Hardison, H. Jacobson, and G. E. Biggs. Improved design of fluid networks with computers. *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, 92(4):43–61, 1966.
- [147] The MathWorks.
- [148] The MathWorks. *MatLab C++ Math Library - User's Guide*. The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive, version 3 edition, 1998. disponível em <www.mathworks.com>.

- [149] The MathWorks. *MatLab Excel Link - User's Guide*. The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive, version 1.0.8. edition, 1999. disponível em <www.mathworks.com>.
- [150] The MathWorks. *MatLab Fuzzy Logic Toolbox*. The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive, version 2 edition, 1999. disponível em <www.mathworks.com>.
- [151] The MathWorks. *MatLab Compiler Manual - User's Guide*. The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive, version 3 edition, 2002. disponível em <www.mathworks.com>.
- [152] R. E. Mau, P. F. Boulos, R. M. Clark, W. M. Grayman, R. J. Tekkipe, and R. R. Trussel. Explicit mathematical models of distribution storage water quality. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 121(10):699–709, 1995.
- [153] G. McCormick and R. S. Powell. Optimal pump scheduling in water supply systems with maximum demand charges. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 129(3):372–379, 2003.
- [154] A. C. Miller and E. V. Richardson. Diffusion and dispersion in open channel flow. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 100(1):159–171, 1974.
- [155] S. Minton, J. Bresina, and M. Drummond. Total order and partial order planning: A comparative analysis. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2:227–262, 1994.
- [156] D. E. Moriarty, A. C. Schultz, and J. J. Grefenstette. Evolutionary algorithms for reinforcement learning. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 11:241–276, 1999.
- [157] W. Mpesha, M. H. Chaudhry, and S. L. Gassman. Leak detection in pipes by frequency response method using a step excitation. *Journal of Hydraulic Research*, 40(1):55–62, 2002.
- [158] G. R. Munavalli and M. S. M. Kumar. Water quality parameter estimation in steady-state distribution system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 129(2):124–134, 2003.
- [159] A. D. Myškis. *Introductory Mathematics for Engineers*. Mir Publishers, Moscow, 1975.
- [160] Jacob Navia. *Lcc win32, An integrated Development Environment - User's Manual*. Q Software Solutions GmbH, <http://www.q-software-solutions.com>, 2001.
- [161] Jacob Navia. *Lcc-Win32. A Compiler System for Windows - Technical Reference*. Q Software Solutions GmbH, <http://www.q-software-solutions.com>, 2002. Baseado no livro «lcc Compiler», escrito por C. W. Fraser e Dave Hanson.
- [162] Jacob Navia. *Programming with lcc-win32*. Q Software Solutions GmbH, <http://www.q-software-solutions.com>, 2003.
- [163] R. Neufville, J. Schaake, Jr., and J. H. Stanford. Systems analysis of water distribution networks. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, ASCE, 97(6):825–842, 1971.

- [164] H. B. Nielsen. Methods for analyzing pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 115(2):139–157, 1989.
- [165] M. Noguchi, D. P. Solomatine, and W. Nishida. Calibration of water quality model by global optimization techniques. In *Proc. 5th International Conference on Hydroinformatics*, Cardiff, UK, 1 a 5 de Julho 2002.
- [166] J. Novais-Barbosa. *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral*, volume 1. Porto Editora, Porto, 1985.
- [167] J. Novais-Barbosa. *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral*, volume 2. Porto Editora, Porto, 1985.
- [168] B. L. Ogden. Pipeline corridors in developing areas. *Transportation Engineering Journal*, ASCE, 107(4):487–495, 1981.
- [169] S-K Oh, W. Pedrycz, and T-C. Ahn. Self-organizing neural networks with fuzzy polynomial neurons. *Applied Soft Computing*, Elsevier, 2:1–10, 2002.
- [170] L. E. Ormsbee. Implicit network calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 115(2):243–257, 1989.
- [171] L. E. Ormsbee and D. J. Wood. Explicit pipe network calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 112(2):166–182, 1986.
- [172] L. E. Ormsbee and D. J. Wood. Hydraulic design algorithms for pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 112(2):1.195–1.207, 1986.
- [173] J. Ortega. On the informativeness of the DNA promoter sequences domain theory. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2:361–367, 1995.
- [174] A. Ostfeld, D. Kogan, and U. Shamir. Reliability simulation of water distribution systems - single and multiquality. *Urban Water*, Elsevier, 4:53–61, 2002.
- [175] O. N. Ozdemir and A. Ucak. Simulation of chlorine decay in drinking water distribution systems. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 128(1):31–39, 2000.
- [176] M. J. Jr. Pelczar, E. C. S. Chan, and N. R. Krieg. *Microbiology*. McGraw HILL, 5 edition, 1986.
- [177] G. Pelletier, A. Mailhot, and J-P. Villeneuve. Modelling water pipe breaks - Three case studies. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 129(2):115–123, 2003.
- [178] P. Perry. Demand forecasting in water supply networks. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 107(9):1.077–1.087, 1981.
- [179] O. Piller, B. Bremond, and P. Morel. A spatial sampling procedure for physical diagnosis in a drinking water supply network. In D. A. Savic and G. A. Walters, editors, *Proc. Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications*, volume 1, pages 309–316, UK, 1999. Exeter University.
- [180] N. Piskunov. *Differential and Integral Calculus*, volume I. Mir Publishers, Moscow, 2nd printing edition, 1977.

- [181] L. J. Pit. Parallel genetic algorithms. Master's thesis, Leiden University, Department of Computer Science, 1995.
- [182] V. M. Ponce and F. D. Theurer. Accuracy criteria in diffusion routing. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 108(6):747–757, 1982.
- [183] J. Powell, J. R. West, N. B. Hallam, C. F. Forster, and J. Simms. Performance of various kinetic models for chlorine decay. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 126(1):13–20, 2000.
- [184] R. A. Prado and A. E. Larretguy. A transient shear stress model for the analysis of laminar water hammer problems. *Journal of Hydraulic Research*, 40(1):45–53, 2002.
- [185] S. L. Prescott and B. Ulanicki. Dynamic modelling of pressure reducing valves. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 129(10):804–812, 2003.
- [186] G. E. Quindry, E. D. Brill, and J. C. Liebman. Optimization of looped water distribution systems. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 107(4):665–679, 1981.
- [187] J. R. Quinlan. Learning first-order definitions of functions. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 5:139–161, 1996.
- [188] H. S. Rao and D. W. Jr. Bree. Extended period simulation of water systems - Part A. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 103(2):97–108, 1977.
- [189] H. S. Rao and D. W. Jr. Bree. Extended period simulation of water systems - Part B. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 103(3):281–294, 1977.
- [190] H. J. Rasmusen. Simplified optimization of water supply systems. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 102(2):313–327, 1976.
- [191] P. V. N. Reddy, K. Sridharan, and P. V. Rao. WLS method for parameter estimation in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 122(3):157–164, 1996.
- [192] L. F. R. Reis, R. M. Porto, and F. H. Chaudhry. Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 123(6):317–326, 1977. Discussion: Pezzinga, G. and Gueli, R.; Closure: Reis, L. F. R., Porto, R. M. and Chaudhry, F. H., JWRPM ASCE, January/February 1999, pag.s 65–67.
- [193] P. Ronge. Performance index sensitivity of optimal control systems with uncertain parameters. *Optimal Control Applications & Methods*, John Wiley & Sons, 6:359–384, 1985.
- [194] L. A. Rossman. *EPANET Users Manual*. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, Ohio, USA, version epa/600/r00/057 edition, Settembre 2000.
- [195] L. A. Rossman and P. F. Boulous. Numerical methods for modeling water quality in distribution systems: A comparison. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 122(2):137–146, 1996.

- [196] L. A. Rossman, P. F. Boulos, and T. Altman. Discrete volume element method for network water quality models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 119(5):505–517, 1993.
- [197] L. A. Rossman, R. M. Clark, and W. M. Grayman. Modelling chlorine residuals in drinking-water distribution systems. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 120(4):803–820, 1994.
- [198] L. A. Rossman and W. M. Grayman. Scale-model studies of mixing in drinking water storage tanks. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 125(8):755–761, 1999.
- [199] L. A. Rossman, J. G. Uber, and W. M. Grayman. Modelling disinfectant residuals in drinking water storage tanks. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 121(10):752–755, 1995.
- [200] W. F. Rowell and J. W. Barnes. Obtaining layout of water distribution systems. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 108(1):137–148, 1982.
- [201] Meier R.W. and B. D. Barkdoll. Sampling design for network model calibration using genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 126(4):245–250, 2000.
- [202] S. Safra and M. Tennenholtz. On planning while learning. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2:111–129, 1994.
- [203] A. Saltelli, K. Chan, and E. M. Scott, editors. *Sensitivity Analysis*. Wiley Series in Probability and Statistics. John Wiley & Sons, LTD, 2000.
- [204] H. M. V. Samani and A. Khayatzaheh. Transient flow in pipe networks. *Journal of Hydraulic Research*, 40(5):637–644, 2002.
- [205] T. Sastri and J. B. Valdes. Rainfall intervention analysis for on-line applications. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 115(4):397–415, 1989.
- [206] D. A. Savic. Single-objective vs. multiobjective optimization for integrated decision support. artigo, Centre for Water Systems, Department of Engineering School of Engineering and Computer Science, University of Exeter, United Kingdom, 2002.
- [207] D. A. Savic and G. A. Walters. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 123(2):67–77, 1997.
- [208] J. H. Scarino. Buried pipelines: Settlement modification and load transfer. *Transportation Engineering Journal*, ASCE, 107(4):469–486, 1981.
- [209] A. Seifi and K. W. Hipel. Interior point method for reservoir operation with stochastic inflows. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 127(1):48–57, 2001.
- [210] M. Shah and G. Sinai. Steady state model for dilution in water networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 114(2):192–206, 1988.

- [211] U. Shamir. Discussion of "Efficient Algorithm for Distribution Networks", by Lemieux, P. F. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 99(8):1.281–1.283, 1973.
- [212] U. Shamir and C. D. D. Howard. Water distribution systems analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 94(1):219–234, 1968.
- [213] A. Shapiro. Sensitivity analysis of generalized equations. *Journal of Mathematical Sciences*, 115:2.554–2.565, 2003.
- [214] A. Shepherd and L. Ortolano. Water supply system operations: Critiquing expert system approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 122(5):348–355, 1996.
- [215] W. G. Shope and R. W. Paulson. Data collection via satellite for water management. *Transportation Engineering Journal*, ASCE, 107(4):445–455, 1981.
- [216] I. A. Sibetheros and E. R. Holley. Spline interpolations for water hammer analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 117(10):1.332–1.351, 1991.
- [217] A. R. Simpson, G. C. Dandy, and L. J. Murphy. Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 120(4):423–443, 1994.
- [218] R. P. Singh and P. S. Mahar. Optimal design of multidiameter, multioutlet pipelines. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 129(3):226–233, 2003.
- [219] D. P. Solomatine. Application of global optimization to models calibration. In *Seminário Methods and Software for Estimation of Large Scale Spatial Interaction Models*, The Hague, Julho, 28 1995. The Netherlands Interdisciplinary Demographic Institute.
- [220] D. P. Solomatine. Random search methods in model calibration and pipe network design. In D. Savic e G. Walters, editor, *Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications*, volume 2, pages 317–332. Research Studies Press, Baldock, UK, 1999.
- [221] D. P. Solomatine. Data-driven modelling: Paradigm, methods, experiences. In *Proc. 5th International Conference on Hydroinformatics*, Cardiff, UK, 1-5 de Julho 2002.
- [222] I. Sârbu and F. Kalmár. Optimization of looped water supply networks. *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.*, 46(1):75–90, 2002.
- [223] U. Straccia. Reasoning within fuzzy description logics. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 14:137–166, 2001.
- [224] L. F. Sugianto. Optimal decision making with imprecise data. *International Journal of Fuzzy Systems*, 3(4):569–576, 2001.
- [225] Y-H. Sun, W. W-G. Yeh, N-S. Hsu, and P. W. F. Louie. Generalized network algorithm for water supply system optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 121(5):392–398, 1995.

- [226] Water Supply and Water Resources Division. *EPANET Programmer's Toolkit*. National Risk Management Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency's, Cincinnati, OH 45268, version 2.00.07 edition, Janeiro 2001.
- [227] P. K. Swamee and A. K. Sharma. Reorganization of water distribution systems. *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 116(3):588–600, 1990.
- [228] A. K. Takyi and B. J. Lence. Chebyshev model for water quality management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 122(1):40–48, 1996.
- [229] T. T. Tanyimboh, M. Tabesh, and R. Burrows. Appraisal of source head methods for calculating reliability of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 127(4):206–213, 2001.
- [230] G. Tesauro. Programming backgammon using self teaching neural nets. *Artificial Intelligence*, Elsevier, 134:181–199, 2002.
- [231] A. Tilmant, E. H. Faouzi, and M. Vanclooster. Optimal operation of multipurpose reservoirs using flexible stochastic dynamic programming. *Applied Soft Computing*, Elsevier, 2:61–74, 2002.
- [232] S. Tongchim and P. Chongstitvatana. Parallel genetic algorithm with parameter adaptation. Department of Computer Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2002.
- [233] P. D. Turney. Cost-sensitive classification: Empirical evaluation of a hybrid genetic decision tree induction algorithm. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2:369–409, 1995.
- [234] K. Vairavamoorthy and J. Lumbers. Leakage reduction in water distribution systems: Optimal valve control. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 124(11):1.146–1.154, 1998.
- [235] J. E. van Zyl, D. A. Savic, and G. A. Walters. A method for improved efficiency in the dynamic modelling of hydraulic networks. In *2nd ISSMO/AIAA Internet Conference on Approximations and Fast Reanalysis in Engineering Optimization*, de 25 de Maio a 2 de Junho 2000.
- [236] D. A. V. Veldhuizen and G. B. Lamont. Multiobjective evolutionary algorithm research: A story and analysis. Final Draft TR9803, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology, Wright Patterson AFB, 14 de Outubro 1998.
- [237] D. A. V. Veldhuizen and G. B. Lamont. Multiobjective evolutionary algorithm: Analyzing the state of the art. *Evolutionary Computation*, 8(2):125–147, 2000.
- [238] António André C. Vieira. Relatório de estágio para ingresso no quadro da administração local. Serviços Municipalizados de Matosinhos, Portugal, Setembro 1993.

- [239] Pedro Cosme C. Vieira. Diagramas de fragmentação graúda - o uso de modelos cinéticos. Relatório para as Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 1991.
- [240] J. P. Vítkovský, A. R. Simpson, and M. F. Lambert. Leak detection and calibrations using transients and genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 126(4):262–265, 2000.
- [241] J. M. Wagner, U. Shamir, and D. H. Marks. Water distribution reliability: Analytical methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 114(3):253–275, 1988.
- [242] T. M. Walski. Technique for calibrating network models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 109(4):360–372, 1983.
- [243] T. M. Walski. Case study: Pipe network model calibration issues. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 112(2):238–249, 1986.
- [244] T. M. Walski. Optimization and pipe-sizing decisions. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 121(4):340–343, 1995.
- [245] T. M. Walski. The wrong paradigm - why water distribution optimization doesn't work. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 127(4):203–205, 2001.
- [246] T. M. Walski, E. D. Jr. Brill, J. Gessler, I. C. Goulter, R. M. Jeppson, K. Lansley, H. L. Lee, J. C. Liebman, L. Mays, D. R. Morgan, and L. Ormsbee. Battle of the network models: Epilogue. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 113(2):191–203, 1987.
- [247] T. M. Walski, D. V. Chase, and D. A. Savic. *Water Distribution Modeling*. Haestad Press, Waterbury, CT USA, 2002.
- [248] T. M. Walski, D. V. Chase, D. A. Savic, W. Grayman, S. Beckwith, and E. Koelle. *Advanced Water Distribution Modelling and Management*. Haestad Press, Waterbury, CT USA, 2003.
- [249] T. Watanatada. Least-cost design of water distribution systems. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 99(9):1.497–1.513, 1973.
- [250] M. P. Wellman. A market-oriented programming environment and its application to distributed multicommodity flow problems. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1:1–23, 1993.
- [251] D. Whitley. *A Genetic Algorithm Tutorial*. Computer Science Department, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, USA, 1994.
- [252] E. Whol. Uncertainty in flood estimates associated width roughness coefficient. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 124(2):219–223, 1998.
- [253] O. Wilchfort and J. R. Lund. Shortage management modelling for urban water supply systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 123(4):250–258, 1996.
- [254] D. J. Wood and C. O. A. Charles. Hydraulic network analysis using linear theory. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 98(7):1.157–1.170, 1972.

- [255] D. J. Wood and A. G. Rayes. Reliability of algorithms for pipe network analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 107(10):1.145–1.161, 1981.
- [256] C. S. Woodward, K. E. Grant, and R. Maxwell. Applications of sensitivity analysis to uncertainty quantification in variably saturated flow. In *XIV International Conference on Computational Methods in Water Resources*, Amsterdam, The Netherlands, Junho 2002.
- [257] H. Wu. Robust output feedback controllers for dynamical systems including delayed perturbations. *International Journal of Systems Science*, 30(2):211–218, 1999.
- [258] Z. Y. Wu and A. R. Simpson. A self-adaptive boundary search genetic algorithm and its application to water distribution systems. *Journal of Hydraulic Research*, 40(2):191–203, 2002.
- [259] B. Xu. Decay estimates for retarded dynamic systems. *International Journal of Systems Science*, 30(4):427–439, 1999.
- [260] C. Xu and I. C. Goulter. Probabilistic model for water distribution reliability. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 124(4):218–228, 1998.
- [261] X. Xu, H. g. He, and D. Hu. Efficient reinforcement learning using recursive least squares methods. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 16:259–292, 2002.
- [262] G. Yu and R. S. Powell. Optimal design of meter placement in water distribution systems. *International Journal of Systems Science*, 25(12):2.155–2166, 1994.
- [263] M. S. Zarghamee. Mathematical model for water distribution systems. *Journal of the Hydraulic Division*, ASCE, 97(1):1–14, 1971.
- [264] C. Zen and J. G. Uber. Reliability of remediation designs in presence of modelling error. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 122(4):253–261, 1996.
- [265] Q. Zhao and T. Nishida. Using qualitative hypotheses to identify inaccurate data. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 3:119–145, 1995.
- [266] O. C. Zienkiewicz and Morgan K. *Finite Elements and Approximation*. Wiley Interscience Publication. John Wiley & Sons, Inc, 1983.

———— // ————
Fim