

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Paulo Victor Melo Sampaio

Métodos para o dimensionamento de redes de abastecimento
de água

Trabalho de Graduação
2005

Infra-Estrutura

Paulo Victor Melo Sampaio

Métodos para o dimensionamento de redes de abastecimento de água

Orientador
Prof.^a Dr.^a Íria Fernandes Vendrame (ITA)

Divisão de Infra-Estrutura Aeronáutica

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
CENTRO TÉCNICO AEROESPACIAL
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2005

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão Biblioteca Central do ITA/CTA

Sampaio, Paulo Victor Melo

Métodos para o dimensionamento de redes de abastecimento de água. / Paulo Victor Melo Sampaio.
São José dos Campos, 2005.
82f.

Trabalho de Graduação – Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica –
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2005. Orientadora: Profª. Drª. Íria Fernandes Vendrame.

1. Sistemas de distribuição de água. 2. Análise numérica. 3. Abastecimento de água. I. Centro Técnico
Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura
Aeronáutica. II. Métodos para o dimensionamento de redes de abastecimento de água.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SAMPAIO, Paulo Victor Melo. **Métodos para o dimensionamento de redes de abastecimento de água**. 2005. 82f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Paulo Victor Melo Sampaio

TÍTULO DO TRABALHO: Métodos para o dimensionamento de redes de abastecimento de água.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2005

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.



Paulo Victor Melo Sampaio

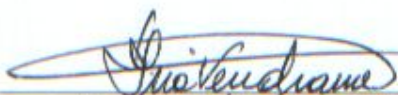
Rua José Cavalcante, nº 77, Parangaba,
CEP 60720-670, Fortaleza, CE.

MÉTODOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Paulo Victor Melo Sampaio
Autor



Prof.ª Dr.ª Íria Fernandes Vendrame (ITA)
Orientadora



Prof. Dr. Flávio Mendes Neto
Coordenador do Curso de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica

São José dos Campos, 25 de novembro de 2005.

Dedico este trabalho a meus pais,
Nilson e Izabel, e a meus irmãos,
Marcos e Renata, por todo amor e apoio.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por todas as graças alcançadas e pela concretização de um grande sonho.

A todos os meus familiares por todo o carinho, compreensão e por toda a instrução que me deram.

À professora Íria Fernades Vendrame pelo empenho e paciência com que me orientou na realização deste trabalho.

A todas as pessoas que formaram a maravilhosa turma da Infra-05, os que seguiram com ela até o fim e os que por motivos diversos tiveram que abandoná-la, por todo o companheirismo e união demonstrados nas horas difíceis e pela euforia contagiante nas comemorações.

Aos grandes amigos Daniel de Melo, Janine, Rafael Menezes, Sérgio Henrique e Victor Júlio, que me foram companhias valiosas e constantes nestes anos.

Por fim, quero fazer um agradecimento especial aos amigos Antônio Costa Barreto Júnior, Gilberto Rebouças Neto, Hugo Vieira de Vasconcelos e João Paulo Marques Reginato, que a cada dia destes últimos cinco anos me davam a certeza de que todo o sacrifício era largamente recompensado pelo prazeroso convívio diário e pela amizade duradoura que se formou. Estas são pessoas a quem verdadeiramente posso chamá-los de irmãos.

“Dizer quem eu sou não é ser quem eu digo.”

Hugo Vieira

Resumo

Neste trabalho são apresentados diversos métodos de dimensionamento de redes de distribuição de água potável, tanto os classicamente utilizados para tal dimensionamento como métodos mais recentemente desenvolvidos e utilizados, fazendo uso de inteligência artificial. São feitas análises a respeito desses métodos para que sejam apontados vantagens e desvantagens de cada um. Também é analisado o *software* CRede, desenvolvido pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica da USP, o qual é utilizado no dimensionamento de uma rede em um bairro de São José dos Campos. O objetivo primordial deste Trabalho de Graduação é a aplicação destas análises no curso de HID-44: Saneamento, ministrado para o quarto ano de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica.

Abstract

This text presents some methods of water distribution net dimensionment, some more commonly used and others most recently developed and improved which use artificial intelligence. These methods are analyzed in order to identify positive and negative points of each one. In addition, the software CRede, developed by the Hydraulic Technological Center Foundation (USP) is analyzed and used to dimension a net in São José dos Campos. Every analysis made in this text has the objective of improve the subject exposed in HID-44 course.

Listas de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

HID-44: Sigla do Curso de Saneamento.

FCTH: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica.

AG: Algoritmos Genéticos.

h_p : Perda de pressão.

Q : Vazão.

DH_i : Incremento de pressão estática no nó i .

J : Perda de carga linear.

K_1 : Constante de ponderação de projeto para dia mais quente do ano.

K_2 : Constante de ponderação de projeto para hora de maior consumo de água do dia.

q : Consumo médio diário de água por habitante de determinada região

P : População da região de estudo.

Sumário

1	<i>Introdução.....</i>	<i>1</i>
2	<i>Métodos de dimensionamento de redes.....</i>	<i>2</i>
2.1	Método dos Seccionamentos Fictícios	2
2.2	Método de Hardy-Cross	3
2.3	Método Nodal com Convergência por Iteração de Pressões	5
2.4	Método Nodal com Convergência pela Técnica de Newton-Raphson	7
2.5	Método dos Algoritmos Genéticos	11
2.5.1	Algoritmo Genético Modificado	14
2.6	Redes Neurais	16
2.6.1	Marco teórico.....	17
2.6.2	Provas	18
2.6.3	Sistemas Híbridos usando Redes Neurais	25
2.7	Lógica Difusa	26
2.7.1	O problema da calibração	27
2.7.2	Descrição do Sistema.....	28
2.7.5	Sistemas Híbridos	32
2.8	Algoritmos Evolutivos	33
2.8.1	Hipótese 1	33
2.8.2	Hipótese 2	37
3	<i>Análise dos Métodos e Comparação entre eles.....</i>	<i>39</i>
4	<i>Análise do software CRedes 2001</i>	<i>44</i>
5	<i>Conclusão.....</i>	<i>46</i>
	<i>Referências Bibliográficas</i>	<i>47</i>
	<i>Apêndice A</i>	<i>48</i>
	<i>Apêndice B</i>	<i>51</i>
	<i>Apêndice C.</i>	<i>56</i>

<i>Apêndice D</i>	66
-------------------------	----

1 Introdução

Este Trabalho de Graduação possui o objetivo de promover uma mudança no ensino da disciplina de Saneamento (HID-44) no que tange o dimensionamento de redes de distribuição de água. Para tanto, são realizadas análises de alguns métodos de dimensionamento: alguns já amplamente conhecidos, como o Método dos Seccionamentos Fictícios e o Método de Hardy-Cross e suas variações; outros em fase ainda de desenvolvimento e que há pouco tempo vêm sendo estudados, como os Métodos dos Algoritmos Genéticos, Lógica Difusa, Redes Neurais e Algoritmos Evolutivos. São expostas as características de cada um dos métodos citados, enumerando-se as vantagens e desvantagens de cada um deles, apontando-se os métodos que merecem maior destaque para cumprir as finalidades do curso de HID-44.

Uma ferramenta que pode ser bastante útil para fins didáticos também é avaliada: o software CRede. Tal programa foi desenvolvido pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, da Universidade de São Paulo, e pode ser utilizado em várias fases do projeto de uma rede de distribuição, desde seu traçado até o orçamento financeiro da obra. Desenvolve-se um projeto de uma rede de distribuição de água com este programa para possibilitar uma avaliação mais precisa.

Por fim, é elaborado neste trabalho um guia simplificado do software analisado, para auxiliar em seu possível uso em atividades do curso de HID-44.

2 Métodos de dimensionamento de redes

Neste capítulo são apresentados os métodos de dimensionamento de redes de distribuição de água potável. Há quatro tipos que são considerados os mais clássicos: o Método dos Seccionamentos Fictícios, o Método de Hardy-Cross de Iteração de Vazões, o Método Nodal com Convergência por Iteração de Pressões e o Método Nodal com Convergência pela Técnica de Newton-Raphson.

Com o tempo, as empresas responsáveis pela produção e distribuição de água potável foram submetidas a uma regulação cada vez mais forte. Este fato tem exigido cada vez mais investimentos em pesquisa de novos métodos e processos que melhorem a operação e gestão da água, em aspectos como o controle da água não contabilizada, cobertura e qualidade da água. Neste contexto, têm surgido novos métodos utilizados no modelamento e dimensionamento de redes de distribuição, métodos estes que se utilizam de artifícios tão em voga ultimamente, como a inteligência artificial.

Quatro métodos que fazem uso de inteligência artificial serão explicitados aqui: Algoritmos Genéticos, Lógica Difusa, Redes Neurais e Algoritmos Evolutivos.

2.1 - Método dos Seccionamentos Fictícios [2]

O princípio deste método consiste em seccionar alguns pontos da rede, de forma que esta se torne uma rede ramificada equivalente, simplificando-se assim os cálculos necessários para a determinação dos valores das incógnitas.

Para definir os sentidos dos escoamentos nesta última, e procurando-se maximizar o aproveitamento da topografia do terreno, os cortes fictícios são feitos em locais onde minimizem o trajeto da água desde os pontos de abastecimento até os de consumo.

Calcula-se a pressão estática nos dois lados de cada corte, segundo diferentes caminhos, e os resultados devem ser aproximadamente iguais. É importante notar que os seccionamentos fictícios não devem diminuir a importância dos condutos principais.

Este método é bastante limitado porque não pode ser aplicado a todo tipo de rede malhada, já que nem sempre é possível transformá-las em redes simplificadas equivalentes.

2.2 – Método de Hardy-Cross [2]

Este é um método iterativo. Toma-se uma rede como um conjunto de circuitos fechados, com ramos comuns, e assumem-se vazões para todas as tubulações. A rede então deve satisfazer às duas hipóteses seguintes:

I – A equação da continuidade é satisfeita em todas as junções.

II – A circulação da pressão é nula em todos os circuitos.

A hipótese I diz que há conservação de massa e energia em um nó.

A hipótese II diz que partindo-se de qualquer ponto de um circuito e calculando-se ou conhecendo-se pressões e perdas de carga sobre um circuito fechado, a circulação da pressão sobre o mesmo é nula. Isso significa que a partir do ponto escolhido, percorre-se o circuito determinando-se pressões em pontos desse caminho e, ao voltar ao ponto de partida, a pressão é a inicialmente conhecida. Em essência, a hipótese II quer dizer que a circulação da pressão, que é propriedade intensiva (ou seja, de ponto) é nula, pois o modelo de rede é conservativo.

A perda de pressão (perda de carga) entre dois nós consecutivos ligados é dada pela lei do escoamento entre ambos. Perdas menores, como as devidas a singularidades não são consideradas. A perda de pressão h no escoamento em uma tubulação funcionando como conduto forçado pode ser expressa por uma equação da forma:

$$h = K.Q^n \quad (1)$$

onde:

K é uma constante real dependente da geometria da tubulação do material e do estado da mesma;

n é um número real.

Inicia-se a resolução da rede assumindo-se vazões para todos os tubos da rede, de forma a satisfazer a equação da continuidade em todos os nós da rede, e calculam-se correções de vazão para todos os circuitos. Após corrigirem-se as vazões dos tubos em toda a rede, calculam-se novas correções de vazão para todos os circuitos, corrigem-se as vazões e assim sucessivamente até que o valor das correções de vazão seja pequeno o suficiente para ser desprezado.

Sendo o processo iterativo, tem-se na i -ésima iteração no tubo m do circuito j a vazão Q_{ijm} , a perda de carga h_{ijm} ,

$$h_{ijm} = k_{jm} \cdot Q_{ijm}^n \quad (2)$$

Convenciona-se um sentido de circulação (horário ou anti-horário) como positivo, e em cada circuito Q_{ijm} será positivo, se tem o mesmo sentido convencionado, e negativo, caso contrário.

Também convenciona-se:

$$h_{ijm} = k_{jm} \cdot Q_{ijm}^n = \begin{cases} k_{jm} \cdot |Q_{ijm}|^n, & \text{se } Q_{ijm} \geq 0 \\ -k_{jm} \cdot |Q_{ijm}|^n, & \text{se } Q_{ijm} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Sobre as vazões Q_{ijm} da i -ésima iteração, calcula-se as correções ΔQ_{ij} para todos os circuitos, e na iteração $e = i + 1$ tem-se vazões

$$Q_{ejm} = Q_{ijm} + \Delta Q_{ij} \quad (4)$$

$$h_{ejm} = k_{jm} \cdot (Q_{ijm} + \Delta Q_{ij})^n \quad (5)$$

O fato de a circulação de energia ser nula em todos os circuitos implica que

$$\sum_m h_{ejm} = \sum_m h_{jm} \cdot (Q_{ijm} + \Delta Q_{ij})^n = 0 \quad (6)$$

$j = 1, \dots, n^\circ$ de circuitos da rede.

Expandindo-se a Equação 6 em série de Taylor da qual se toma apenas os dois primeiros termos, tem-se

$$\sum_m h_{jm} \cdot (Q_{ijm} + n \cdot Q_{ijm}^{n-1} \cdot \Delta Q_{ij}) = 0 \quad (7)$$

$j = 1, \dots, n^\circ$ de circuitos da rede

Da Equação 7 resulta que

$$\Delta Q_{ij} = - \frac{\sum_m (k_{jm} \cdot Q_{ijm}^n)}{n \cdot \sum_m (k_{jm} \cdot Q_{ijm}^{n-1})} \quad (8)$$

O sinal de ΔQ_{ij} resulta automaticamente contrário ao de

$$\sum_m h_{ijm} = \sum_m k_{jm} \cdot Q_{ijm}^n \quad (9)$$

A consideração

$$h_{ijm} = k_{jm} \cdot Q_{ijm}^n = \begin{cases} k_{jm} \cdot |Q_{ijm}|^n, & \text{se } Q_{ijm} \geq 0 \\ -k_{jm} \cdot |Q_{ijm}|^n, & \text{se } Q_{ijm} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

pode ser expressa como

$$h_{ijm} = k_{jm} \cdot Q_{ijm}^n = k_{jm} \cdot \frac{|Q_{ijm}| \cdot |Q_{ijm}|^n}{Q_{ijm}} = k_{jm} \cdot \frac{|Q_{ijm}|^{n+1}}{Q_{ijm}}, Q_{ijm} \neq 0 \quad (10)$$

e fica-se com

$$\Delta Q_{ij} = \frac{\sum_m \left[\frac{k_{jm} \cdot |Q_{ijm}|^{n+1}}{Q_{ijm}} \right]}{n \cdot \sum_m \left[\frac{k_{jm} \cdot |Q_{ijm}|^n}{Q_{ijm}} \right]} \quad (11)$$

que é uma forma bastante conveniente para cálculos computacionais.

2.3 - Método Nodal com Convergência por Iteração de Pressões [2]

Este método é uma variação do método explicitado anteriormente (que realiza iterações de vazão) e baseia-se na satisfação da equação da continuidade de massa em todos os nós da rede.

Inicia-se com a estimativa ou arbitração de pressões nos nós da rede, que vão sendo corrigidas a cada iteração, até que as correções sejam desprezíveis.

A vazão do nó i para o nó j , ligados por um tubo é assumida como sendo da forma:

$$R_{ij} = \begin{cases} R_{ij} \cdot \frac{(H_j - H_i)}{|H_j - H_i|} \cdot |H_j - H_i|^{1/n}, & \text{se } H_j \neq H_i \\ 0, & \text{se } H_j = H_i \end{cases} \quad (12)$$

$$R_{ij} = \left(\frac{1}{k_{ij}} \right)^{1/n} \quad (13)$$

onde,

H_i é a pressão estática do nó i ;

H_j é a pressão estática do nó j ;

K_{ij} é uma constante real que depende da geometria da tubulação e do material da mesma;

n é um número real.

Nota-se que a Equação 12 é equivalente a

$$S_{ij} = \begin{cases} R_{ij} \cdot |H_j - H_i|^{1/n}, & \text{se } H_j \geq H_i \text{ (fluxo de } j \text{ para } i) \\ -R_{ij} \cdot |H_j - H_i|^{1/n}, & \text{se } H_j < H_i \text{ (fluxo de } i \text{ para } j) \end{cases} \quad (14)$$

Vê-se portanto que $Q_{ij} > 0$ se $H_j > H_i$ e $Q_{ij} < 0$ se $H_j < H_i$.

Sendo QNO_i a vazão do nó i que entra na rede (neste caso $QNO_i > 0$) ou sai da mesma (e neste caso $QNO_i < 0$) e, havendo N nós na rede, tem-se

$$\sum_j Q_{ij} + QNO_i = F_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (15)$$

Enquanto os valores de H_i e H_j não estão corretos, a equação da continuidade não é satisfeita, e $F_i \neq 0$, para pelo menos um i .

Caso contrário, $F_i = 0$, para todo $i \in \{1, 2, \dots, n\}$. Observa-se que é necessário que pelo menos um H_i seja condição de contorno (parâmetro) da rede, ou pode ocorrer que sejam encontradas diferentes superfícies (soluções) da mesma família de superfícies para diferentes valores de partida assumidos na resolução da rede.

Corrigir-se-á a pressão estática H_i em cada nó i com um incremento DH_i , a cada iteração. Assumir-se-á, também,

$$S_{ij} = \begin{cases} \frac{(H_j - H_i)}{|H_j - H_i|}, & \text{se } H_j \neq H_i \\ 0, & \text{se } H_j = H_i \end{cases} \quad (16)$$

Portanto

$$S_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } H_j > H_i \\ -1, & \text{se } H_j < H_i \\ 0, & \text{se } H_j = H_i \end{cases} \quad (17)$$

Fornecendo sinal para Q_{ij} coerente com o sentido do escoamento. S_{ij} não varia $DH_i \rightarrow 0$ que é o que se procura. Lembrando que se procura $F_i = 0$, a Equação 15 fornece

$$\sum_j [S_{ij} R_{ij} \cdot |H_j - (H_j - H_i)|^{1/n}] + QNO_i = 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (18)$$

Expandindo-se em série de Taylor o termo entre barras, da qual se toma os dois primeiros termos, tem-se:

$$\sum_j \left\{ S_{ij} R_{ij} \left[|H_j - H_i|^{1/n} - \frac{DH_i}{n} |H_j - H_i|^{\frac{1}{n}-1} \right] \right\} + QNO_i = 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (18)$$

$$\sum_j \left[S_{ij} R_{ij} |H_j - H_i|^{1/n} \right] - \frac{DH_i}{n} \cdot \sum_j \left[S_{ij} R_{ij} |H_j - H_i|^{\frac{1}{n}-1} \right] + QNO_i = 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (19)$$

$$DH_i = \frac{\sum_j \left[S_{ij} R_{ij} |H_j - H_i|^{1/n} \right] + QNO_i}{\frac{1}{n} \cdot \sum_j \left[S_{ij} R_{ij} |H_j - H_i|^{\frac{1}{n}-1} \right]}, \quad i = 1, \dots, N \quad (20)$$

Forma conveniente a cálculos computacionais.

2.4 - Método Nodal com Convergência pela Técnica de Newton-Raphson [2]

Este método consiste em se determinar as incógnitas das redes cujos valores satisfaçam à equação da continuidade de massa em todos os N nós da rede e às leis do escoamento assumidas entre os pares de nós ligados entre si.

Para escoamentos forçados entre dois nós, sem bombas, assume-se a equação de Hazen-Williams como lei de escoamento (podia ser outra equação), e, para os escoamentos com bombas, devem ser tomadas equações paramétricas do escoamento determinado por estas.

Igualmente ao método anterior, tem-se:

$$F_i = \sum_j Q_{ij} + QNO_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (21)$$

onde a Q_{ij} é dada pela equação de Hazen-Williams,

$$Q_{ij} = \begin{cases} \frac{(H_j - H_i)}{|H_j - H_i|^{0,46} \cdot R_{ij}^{0,54}}, & \text{se } H_j \neq H_i \\ 0, & \text{se } H_j = H_i \end{cases} \quad (22)$$

Com

$$R_{ij} = \frac{10,643 \cdot L_{ij}}{C_{ij}^{1,85} \cdot D_{ij}^{4,87}} \quad (23)$$

Onde

L_{ij} é o comprimento de tubulação ligando o nó i ao nó j ($L_{ij} = L_{ji}$), dado em metros;

D_{ij} é o diâmetro dessa tubulação ($D_{ij} = D_{ji}$), em metros;

C_{ij} é uma constante real que depende da natureza do material das paredes do tubo e de sua propriedade (adimensional) ($C_{ij} = C_{ji}$).

A Equação 22 é válida entre dois nós ligados por tubulações sem bombas. Caso não haja ligação entre os nós i e j , $Q_{ij} = 0$. Esta equação 22 equivale a:

$$Q_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{R_{ij}^{0,54}} \cdot |H_j - H_i|^{0,54}, & \text{se } H_j \geq H_i \\ -\frac{1}{R_{ij}^{0,54}} \cdot |H_j - H_i|^{0,54}, & \text{se } H_j < H_i \end{cases} \quad (24)$$

Aplicando-se a Equação 22 na Equação 21 tem-se que:

$$F_i = \sum_{j \neq i} \left[\frac{(H_j - H_i)}{|H_j - H_i|^{0,46} \cdot R_{ij}^{0,54}} \right] + QNO_i = 0, \quad H_j \neq H_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (25)$$

Se $H_j = H_i$, tem-se que:

$$\frac{(H_j - H_i)}{|H_j - H_i|^{0,46} \cdot R_{ij}^{0,54}} = 0 \quad (26)$$

Se $F_i = 0$, para $i = 1, 2, \dots, N$, os valores das incógnitas são soluções da rede. Caso contrário é necessário determinar-se os valores das incógnitas que tornam isso verdade. Isso é feito resolvendo-se o sistema de equações não-lineares, representado pela Equação 25, o que será feito utilizando-se o método de Newton-Raphson.

O método de Newton-Raphson consiste em assumir valores de partida para as incógnitas, que serão corrigidas iterativamente até atingir-se a solução ou divergir-se, e nesse caso, reinicia-se o processo. A Figura 1 esclarece o mecanismo do método no caso unidimensional, cuja essência é a mesma do caso multidimensional.

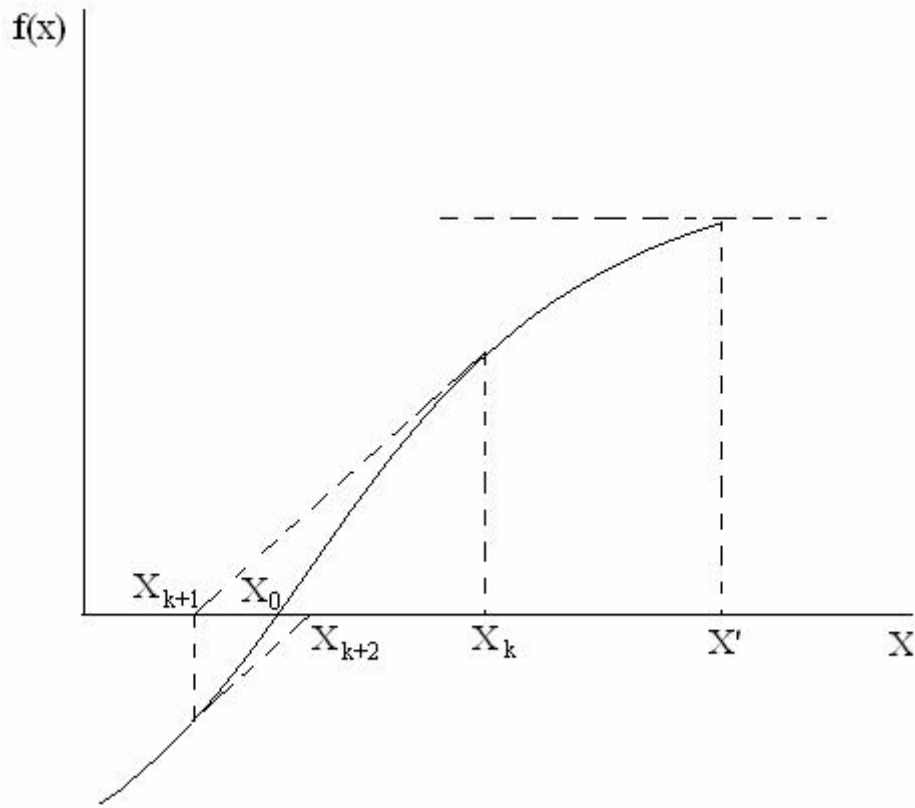


Figura 1: Método de Newton-Raphson no caso uni-dimensional [2].

Da Figura 1 vê-se que

$$\frac{f(x_k)}{x_k - x_{k+1}} = \tan \alpha = \left. \frac{df(x)}{dx} \right)_{x=x_k} \quad (27)$$

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{\left. \frac{df(x)}{dx} \right)_{x=x_k}} \quad (28)$$

E também da Equação 28 conclui-se que:

$$f(x_k) = (x_k - x_{k+1}) \cdot \left. \frac{df(x)}{dx} \right)_{x=x_k} \quad (29)$$

$$f(x_k) + (x_{k+1} - x_k) \cdot \left. \frac{df(x)}{dx} \right)_{x=x_k} = 0 \quad (30)$$

Fazendo-se $x_{k+1} - x_k = \Delta x_k$ tem-se:

$$f(x_k) + \left. \frac{df(x)}{dx} \right)_{x=x_k} \cdot \Delta x_k = 0 \quad (31)$$

Considerando-se x_k o valor atual de x , tem-se:

$$f(x_k) + \frac{df(x)}{dx} \cdot \Delta x = 0 \quad (32)$$

Esta equação resulta em:

$$F_i(x_1, x_2, \dots, x_N) = 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (33)$$

Assim:

$$F_i(x_1, x_2, \dots, x_N) + \sum_j \left[\frac{\partial F_i}{\partial x_j} \cdot \Delta x_j \right] = 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (34)$$

No caso de uma rede de abastecimento de água, algumas das incógnitas x_i podem ser pressões estáticas, compondo o conjunto $\overline{H} = \{H_j/H_j \text{ não é condição de contorno (parâmetro) da rede, } j \in \{1, 2, \dots, N\}\}$. Outras incógnitas podem ser vazões de nó, formando o conjunto $\overline{QNO} = \{QNO_j/QNO_j \text{ não é parâmetro da rede, } j \in \{1, 2, \dots, N\}\}$. E outros coeficientes de Hazen-Williams das tubulações, formando o conjunto $\overline{C} = \{C_{ij}/C_{ij} \text{ não é parâmetro da rede, } i \neq j, C \in \{1, 2, \dots, N\}\}$. Neste estudo não assumiremos os comprimentos das tubulações e nem as cotas geométricas dos nós, como possíveis incógnitas, mas estas extensões são possíveis de forma análoga a D_{ij} e H_i , respectivamente.

As Equações 33 e 34 tornam-se então em

$$F_i = F_i(\overline{C}, \overline{D}, \overline{H}, \overline{QNO}) = 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (35)$$

$$F_i + \sum_{C \in \overline{C}} \left[\frac{\partial F_i}{\partial C_{ij}} \cdot \Delta C_{ij} \right] + \sum_{D \in \overline{D}} \left[\frac{\partial F_i}{\partial D_{ij}} \cdot \Delta D_{ij} \right] + \sum_{H \in \overline{H}} \left[\frac{\partial F_i}{\partial H_j} \cdot \Delta H_j \right] + \sum_{C \in \overline{C}} \left[\frac{\partial F_i}{\partial C_j} \cdot \Delta C_j \right] = 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (36)$$

com

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } i = j \\ 0, & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (37)$$

E onde

$$\frac{\partial F_i}{\partial H_i} = \frac{\partial F_i}{\partial H_j}, \quad i, \quad j = 1, \dots, N \quad (38)$$

$$\frac{\partial F_i}{\partial H_i} = -\sum_{i \neq j} \frac{\partial F_i}{\partial H_j}, \quad i, \quad j = 1, \dots, N \quad (39)$$

As Equações 37 representam um sistema que, escrito na forma matricial, toma o seguinte aspecto:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial C_{pq}} \dots \frac{\partial F_1}{\partial D_{mn}} \dots \frac{\partial F_1}{\partial H_s} \dots \frac{\partial F_1}{\partial QNO_z} \\ \vdots \\ \frac{\partial F_N}{\partial C_{pq}} \dots \frac{\partial F_N}{\partial D_{mn}} \dots \frac{\partial F_N}{\partial H_s} \dots \frac{\partial F_N}{\partial QNO_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta C_{pq} \\ \vdots \\ \Delta C_{pq} \\ \vdots \\ \Delta C_{pq} \\ \vdots \\ \Delta QNO_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_1 \\ \vdots \\ -F_N \end{bmatrix} \quad (40)$$

Caso haja na rede elementos como bombas ou válvulas ligando dois nós k e e , pode-se escrever:

$$Q_{ke} = f(H_k - H_e) \quad (41)$$

Onde f é uma função paramétrica da bomba, e fica-se com

$$F_i = \sum_j Q_{ij} + QNO_i, \quad i \neq k, \quad i \neq e, \quad j \neq k, \quad j \neq e, \quad i = 1, \dots, N \quad (42)$$

$$F_k = \sum_{j \neq e, j \neq k} Q_{ij} + QNO_k + f(H_k - H_e) \quad (43)$$

$$F_e = \sum_{j \neq e, j \neq k} Q_{ej} + QNO_e + f(H_e - H_k) \quad (44)$$

Portanto,

$$\frac{\partial F_k}{\partial H_e} = \frac{\partial f}{\partial H_e} \quad (45)$$

$$\frac{\partial F_e}{\partial H_k} = -\frac{\partial f}{\partial H_k} \quad (46)$$

$$\frac{\partial F_k}{\partial H_k} = -\sum_{i \neq k, i \neq e} \frac{\partial F_k}{\partial H_i} + \frac{\partial f}{\partial H_k} \quad (47)$$

$$\frac{\partial F_e}{\partial H_e} = -\sum_{i \neq k, i \neq e} \frac{\partial F_e}{\partial H_i} + \frac{\partial f}{\partial H_e} \quad (48)$$

2.5 – Método dos Algoritmos Genéticos [5]

Algoritmos genéticos são utilizados para realizar a calibração de redes de distribuição de água, realizando-se assim uma melhor “cobertura” do comportamento da rede, como detecção de vazamentos, valores mais adequados de vazão, etc.

Nos processos normais de simulação hidráulica de uma rede com NT elementos de tubos e NN nós, deve-se determinar NT vazões nos tubos e NN pressões nos nós através de NT equações de perda de energia e NN equações de continuidade. Isto configura o problema como matematicamente solucionável. Já no caso de calibração, o número de incógnitas aumenta muito mais que o número de equações, conforme apresenta a Tabela 1. Como consequência deste fato, o problema de calibração não tem solução ou é indeterminado e só é possível realizar uma aproximação da solução.

	Incógnitas	Equações
Detalhes	NT: Vazões nos tubos	NN: Equações de continuidade
	NT: Rugosidades nos tubos	NT: Equações de conservação de energia
	NT: Coeficientes de perdas menores nos tubos	nt: Tubos com registro de vazão, $nt \ll NT$
	NT: Diâmetros reais das tubulações	nn: Nós com registro de pressão, $nn \ll NN$
	NN: Pressões nos tubos	
	NN: Coeficientes de emissores	
	NN: Expoentes de coeficientes de emissores	
Total	4.NT + 3.NN	NT + NN + nt + nn
NT: Número de Tubos NN: Número de Nós		

Tabela 1: Incógnitas e equações de um problema de calibração [5].

Devido à grande quantidade de parâmetros, ao se finalizar o processo conta-se com uma grande quantidade de subprodutos úteis para a gestão e operação de uma rede de distribuição. Podem ser citados como subprodutos a localização de fugas de maior relevância e a concentração de fugas não detectáveis.

Os trabalhos mais importantes desenvolvidos sobre Algoritmos Genéticos (AG) são desenvolvimentos de um programa chamado CALIBRA [5], que oferece uma ferramenta para comparação de séries observadas em campo, de pressão e vazão, com as séries simuladas, resultado do cálculo hidráulico de uma rede de distribuição na qual são realizadas variações no conjunto de incógnitas mediante um jogo de instruções dadas pelo usuário. Estudos posteriores retomaram as estruturas de calibração identificadas no desenvolvimento do programa CALIBRA e aplicaram-nas no desenvolvimento de um novo programa chamado GENETICA, que implementou um AG modificado para a calibração de redes de distribuição, que levam em conta critérios hidráulicos de otimização.

O princípio básico da calibração por AG consiste na seleção de uma possível solução para o problema. Uma vez que se consegue um conjunto considerável de soluções, o AG seleciona quantas vezes o usuário deseje ou até que se encontre uma variação muito pequena entre as melhores soluções encontradas.

A Figura 2 apresenta um esquema geral de funcionamento do AG.

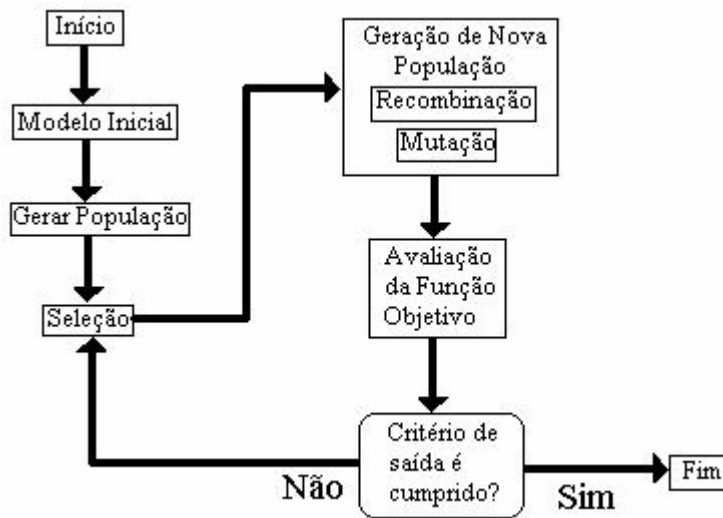


Figura 2: Esquema de um algoritmo genético geral [5].

Uma rede de distribuição é formada por um grande número de elementos, por isso é necessário limitar o conjunto de variáveis a serem calibradas para evitar um aumento considerável no tempo de processamento. As variáveis calibráveis escolhidas são: tubos, diâmetros, rugosidades, nós e coeficientes de descarga.

Um aspecto que merece importância é a quantidade de gerações que o algoritmo deve ser executado. Estudos [5] afirmam que o número de gerações em que um processo de calibração pode convergir é proporcional à raiz quadrada da dimensão do sistema.

Com o objetivo de melhorar o processo de calibração é necessário contar com um bom processo de solução e recombinação dos indivíduos em cada geração. Dois critérios mais usados para essa recombinação são: admissão de pais (escolhe-se os indivíduos com melhor ajuste como candidatos a passar à geração seguinte) e seleção ponderada por ajuste (é ampliado o campo de seleção de indivíduos a toda a geração para se assegurar a diversidade dos indivíduos).

No critério de admissão de pais, ao se escolher os indivíduos com melhor ajuste como candidatos a prosseguir no processo de evolução, é possível que não seja necessário modificar o modelo ao se encontrar um bom ajuste.

No critério de seleção ponderada inicialmente se normaliza a 1 o ajuste dos indivíduos de maneira que os que possuam melhor ajuste tenham um intervalo de escolha mais amplo.

Uma vez construída esta estrutura são gerados números aleatórios sobre o domínio selecionando os indivíduos da geração seguinte.

Existe um método de otimização da calibração conhecido como paralelização. Este método visa paralelizar cada critério de migração [5] e apresenta a vantagem de aproveitar a tecnologia de processamento paralelo disponível atualmente, além de proporcionar uma redução no tempo de cálculo.

Embora o programa GENÉTICA necessite um tempo menor que o CALIBRA para se obter um resultado aceitável, o algoritmo genético, da forma que é aplicado atualmente, apresenta alguns inconvenientes: apresenta um erro quadrático maior; não consegue modelar adequadamente pontos especiais; não fornece soluções melhores que as encontradas manualmente para um número aceitável de gerações. Entretanto, o método do AG merece um esforço maior para que sua eficiência seja melhorada, o que pode ocorrer por meio de uma implementação de um esquema de seleção que mantenha a diversidade dos indivíduos e da paralelização do algoritmo.

2.5.1 - Algoritmo Genético Modificado [6]

Para adaptá-lo da melhor maneira ao processo particular da calibração, o método dos AG básicos sofreu algumas modificações. Essas modificações também foram realizadas para assemelhar mais o processo à seleção natural e permitir provar várias configurações do algoritmo genético de maneira simultânea.

2.5.1.1 - Semelhança com o processo de seleção natural

Existem certas propriedades evolutivas que não pertencem aos indivíduos nem ao modelo original. Algumas dessas propriedades são:

- a. Quantidade de indivíduos por geração;
- b. Quantidade de sobreviventes com os melhores qualificadores;
- c. Outras variáveis que determinam o passo de uma geração a outra.

Como não se tem certeza de quais são os valores ótimos destas variáveis, e tampouco são variáveis do problema que o algoritmo tenta resolver, deve-se dar um tratamento distinto a essas variáveis. Para tanto são definidas as espécies.

Cada espécie é um algoritmo genético independente com suas próprias variáveis evolutivas. Todas as espécies vão evoluindo ao mesmo tempo, o que permite observar quais

são os melhores valores das variáveis evolutivas. Além disso, cada espécie tem seu modelo original, o que permite que o algoritmo genético trabalhe com distintas hipóteses iniciais que podem ser bastante diferentes em suas propriedades topológicas.

É introduzido também no algoritmo genético o conceito de ambiente e competência. O ambiente pode manter uma quantidade máxima de indivíduos totais, somando-se os de todas as espécies que se encontram competindo. À medida que transcorrem as gerações, o ambiente extingue ou adiciona pares a cada espécie para que esta possa gerar menos ou mais indivíduos. Esta repartição de pares se realiza de acordo com o comportamento dos qualificadores das espécies. Assim, eventualmente, pode-se extinguir uma ou mais espécies, evoluindo-se apenas as melhores.

Também é permitida a possibilidade de sobrevivência de certos indivíduos de baixos qualificadores, para que sejam evitados os máximos locais. Caso os melhores indivíduos comecem a se bloquear em um máximo local, os indivíduos com baixos qualificadores mostram-se mais importantes e promissores.

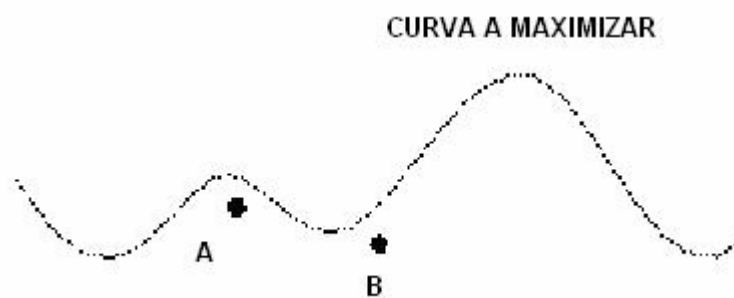


Figura 3: Curva de importância dos indivíduos de baixos qualificadores [6].

Na Figura 3, pode-se observar os indivíduos A e B. A curva representa o problema que se quer maximizar. Os indivíduos, através da evolução, vão melhorando e seus filhos vão se colocando em posições superiores sem poder superar a curva. O indivíduo A é melhor que o B, embora a descendência do indivíduo B tenha melhores possibilidades que a do indivíduo A. Esta é razão da importância da sobrevivência dos indivíduos de baixos qualificadores.

2.5.1.2 - Adaptação ao problema de calibração e a conservação de critérios

Para o processo específico de calibração de uma rede de distribuição, também realizaram-se outras modificações no algoritmo genético para torná-lo mais versátil, permitir a prova de certas hipóteses menos convencionais assegurar a política de conservação de

critérios. Uma destas mudanças é a definição de uma porcentagem de indivíduos bem emparelhados. Significa que, entre os indivíduos sobreviventes, alguns se emparelham unicamente com outros que tenham qualificadores semelhantes. Os demais se aparelharam com qualquer indivíduo sobrevivente.

Há também definição de espécies assexuadas, sexuadas e multi-sexuadas, o que significa que cada indivíduo pode ter um, dois ou mais pais, segundo a definição de sua espécie.

Outro conceito importante é o de elo. Com este, as cadeias de DNA não estão formadas diretamente por cromossomos, e sim por elos. Os elos armazenam listas de cromossomos. Isto é feito porque cada cromossomo representa um elemento da rede de aqueduto e surgiu a necessidade de um método para diferenciar o tipo dos elementos (nós, tubos, tanques). Então, a cadeia de DNA está formada por elos. Existe um elo que armazena os nós, um que armazena os tanques, etc. Cada elo guarda como cromossomos, objetos da rede de tipo respectivo (o de tubos guarda objetos tipo tubo, o de nós guarda objetos tipo nó, etc.).

Também é permitida a definição de grupos que obrigam a modificar alguns genes com o tempo, o que evita a aleatoriedade do algoritmo gere rugosidades muito desiguais em tubos submetidos a condições hidráulicas parecidas.

2.6 – Redes Neurais [8]

Na modelação de redes de distribuição de água potável se utilizam os dados que descrevem fisicamente uma rede para, através de algumas equações de comportamento, obter variáveis que descrevem a hidráulica do sistema. Com o tempo, as variáveis físicas mudam devido ao envelhecimento das tubulações, mas estas não podem ser medidas, pois as tubulações já estão funcionando embaixo da terra. Por isso, estas variáveis devem ser estimadas a partir de medições em campo das variáveis hidráulicas, um processo inverso da modelação.

Para realizar a estimativa das variáveis físicas, são experimentadas redes neurais com dados de entrada/saída para que se possa estimar rugosidades a partir de pressões e vazões de campo. Esta rede neural é própria de uma rede de aqueduto em que não variam a conectividade nem as longitudes. Caso alguma dessas características seja alterada, a rede neural deve ser refeita.

2.6.1 - Marco teórico

Uma rede neural é um sistema que relaciona variáveis de entrada com variáveis de saída através de uma estrutura pré-definida em termos de certos coeficientes. Caso os coeficientes já estejam estabelecidos, a rede neural permite calcular fácil e rapidamente as saídas a partir das entradas (Figura 4).

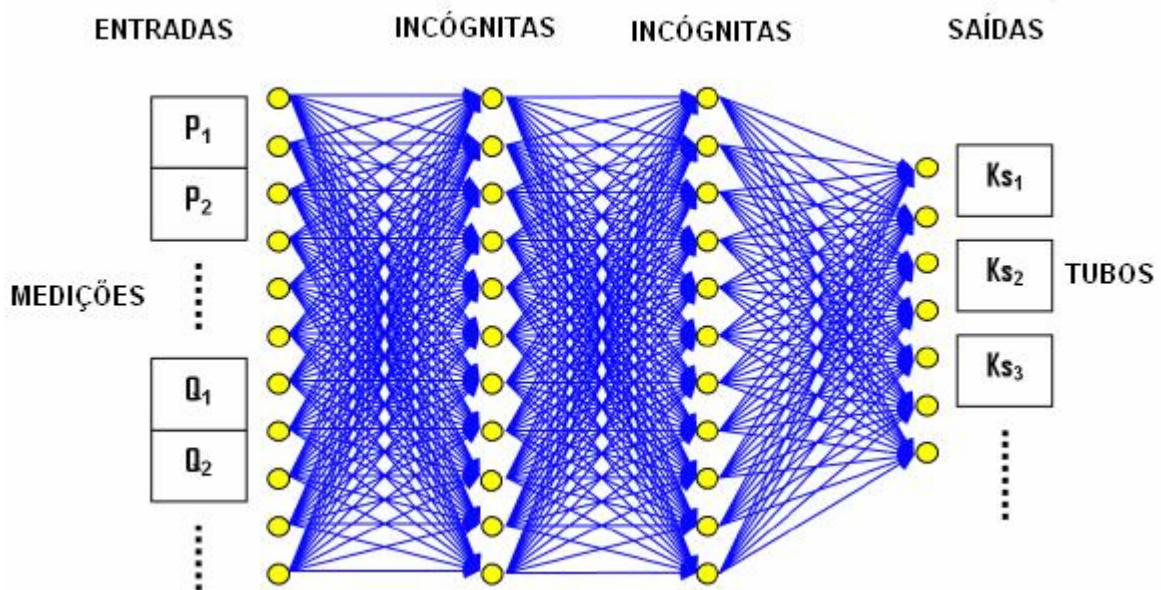


Figura 4: Estrutura geral das redes neurais [8].

Não sendo desta forma, a rede neural pode descobrir as relações (como coeficientes) através de um processo chamado treinamento. Para realizar este processo requer-se o conhecimento de vários conjuntos de entradas e saídas. O processo de treinamento minimiza os erros entre as saídas esperadas e as calculadas modificando os coeficientes. Neste processo, recorre-se por diminuição de grau sobre o espaço de erro definido com os mínimos quadrados.

As redes neurais provadas têm as seguintes características:

- As entradas são todas as pressões e vazões da rede;
- As saídas são as rugosidades das tubulações;
- Todos os valores que entram ou saem da rede estão normalizados no intervalo $[0,01 - 0,99]$, sendo através de uma normalização linear ou logaritmica;
- Têm incógnitas (uma ou duas);
- Interconexão total entre uma variável e a seguinte;

- Quantidade de nós de saída igual à quantidade de tubos da rede de aqueduto;
- Incógnitas têm o dobro de nós que uma variável de entrada;
- A função de ativação é a sigmóide;
- Treinamento com Back Propagation.

Toda a rede tem uma quantidade de nós de entrada igual à quantidade de nós mais a quantidade de tubos da rede de aqueduto.

2.6.2 - Provas

Em princípio, Salas, Saldarriaga e Gómez (2004) [6] realizaram provas simples que foram tornando-se mais complexas e modificando-se com respeito aos resultados que foram sendo obtidos. A seguir são mostrados apenas os resultados mais representativos.

2.6.2.1 - Dois tramos

A primeira prova [6] foi realizada para uma tubulação de dois tramos. O treinamento realizou-se modificando as rugosidades nos dois tramos e calculando as pressões e vazões resultantes. A rede neural foi validada com pressões e vazões conhecidas que deveriam levar a rugosidades predeterminadas, diferentes das do treinamento. A Figura 5 mostra o erro total da rede neural através do processo de treinamento. A linha inferior representa a validação e a superior representa o treinamento. Nota-se que o aperfeiçoamento da rede neural foi bem sucedido.

A Figura 6 mostra a distribuição do erro para a rugosidade normalizada nos dados de validação. Vê-se que 100% dos erros são inferiores a 0,2 e 40% são inferiores a 0,1, o que chega a ser um resultado satisfatório.

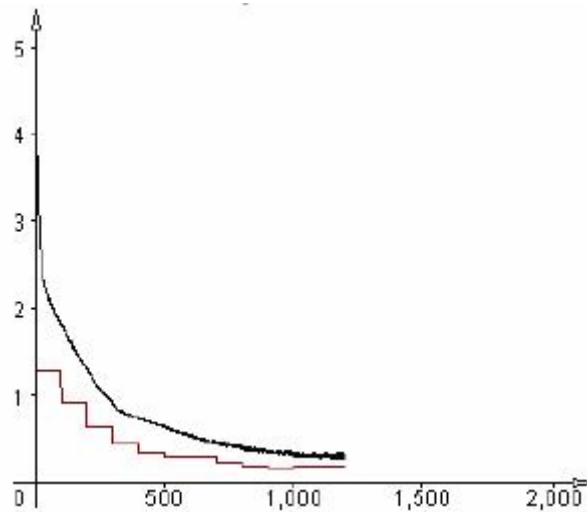


Figura 5: Erro através do treinamento [8].

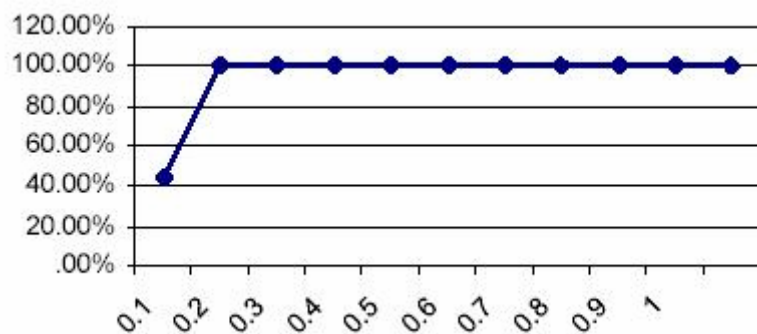


Figura 6: Distribuição do erro [8].

2.6.2.2 - Combinatória

Foram desenhadas redes neurais de uma incógnita para redes de distribuição de água potável até 60 tubos. O treinamento foi realizado combinando cinco rugosidades típicas sobre todas as tubulações. Foram utilizadas as seguintes rugosidades: 0,0000015; 0,00003; 0,00015; 0,00025 e 0,003 metros. O treinamento com combinatória exigiu bastante tempo de cálculo para redes de aqueduto de mais de sete tubos e se mostrou impraticável para redes medianas (por volta de 40 tubos). Os resultados de um dos experimentos são exibidos na Figura 7.

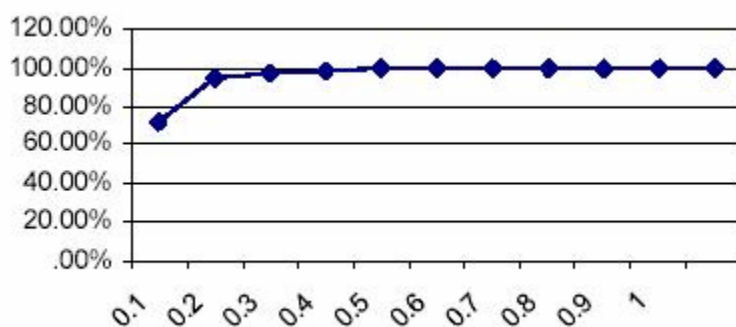


Figura 7: Resultados de rede de quatro tubos (Combinatória) [8].

2.6.2.3 - Discriminada

Nesta prova as redes neurais foram testadas e validadas com diferentes rugosidades, mas com a mesma rugosidade em toda a rede para cada experimento. Isto não é aplicável na prática, pois as tubulações nas redes de aqueduto normalmente têm diferentes rugosidades. Entretanto, é útil apenas como exercício acadêmico para observar caso as redes neurais podem aprender a calibrar sem ter disponível toda a informação e em ambientes de redes fechadas.

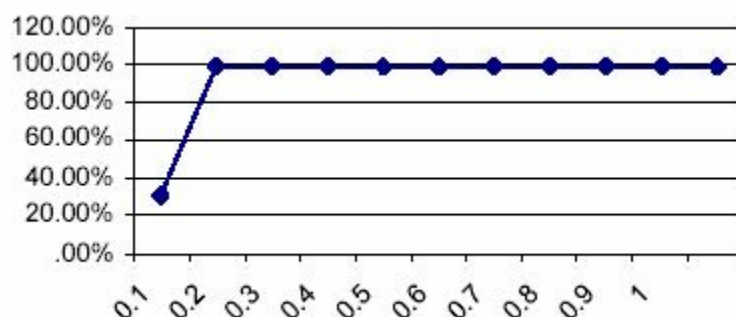


Figura 8: Resultado de rede fechada de 50 elementos de tubo (Discriminada) [8].

A Figura 8 mostra que o experimento é satisfatório e é possível proceder prova sob ambientes de rugosidades distintas na rede.

2.6.2.4 - Treinamento Discriminado com Validação Aleatória

Neste experimento foi utilizado o mesmo treinamento do número anterior (discriminado). No entanto, a validação realizou-se com redes de distribuição de água potável cujos tubos têm rugosidades diferentes, geradas aleatoriamente.

Os resultados de Salas, Saldarriaga e Gómez (2004) [6] para este tipo de prova são mostrados na Figura 9. A rede neural somente melhora a sua calibração de maneira discriminada. Não se deve usar esta rede neural para calibrar redes com rugosidades mescladas.

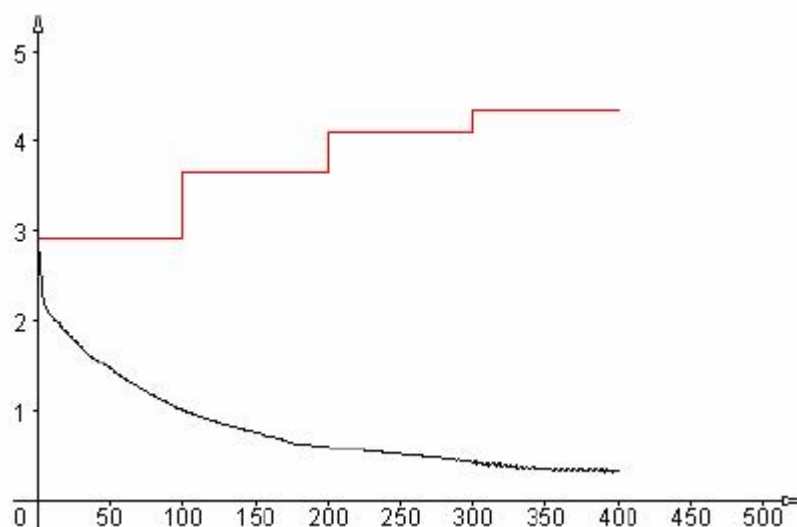


Figura 9: Treinamento discriminado de validação aleatória [8].

2.6.2.5 – Duplex com uma incógnita

Neste experimento o treinamento foi realizado com rugosidades discriminadas e aleatórias. A validação também. A Figura 10 mostra um treinamento satisfatório. A Figura 11 mostra que os resultados para uma rede de 50 tubos também são satisfatórios.

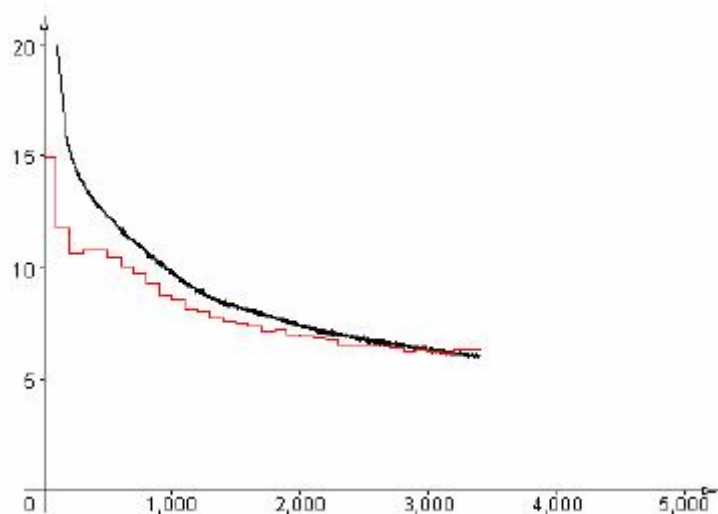


Figura 10: Aperfeiçoamento duplex [8].

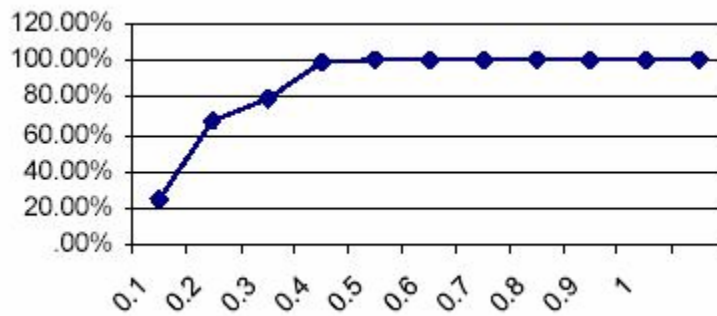


Figura 11: Resultado de rede fechada de 50 elementos de tubo [8].

2.6.2.6 - Duplex com duas incógnitas

Neste experimento foi agregada uma incógnita para tentar melhorar os resultados da prova anterior. A Figura 12 mostra com quadros a série de resultados com duas incógnitas. A melhoria é muito pequena em redes medianas. Em redes pequenas, com menos de 10 tubos, há uma melhoria mais notável.

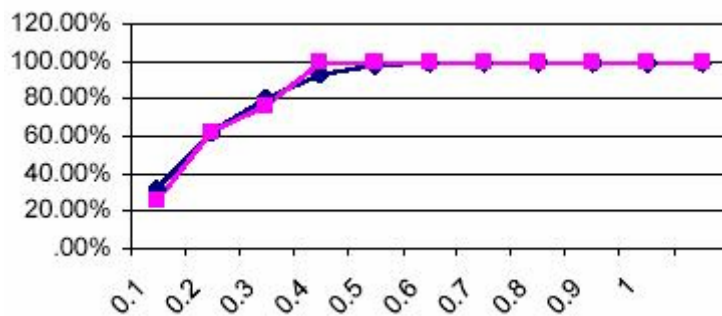


Figura 12: Resultado de rede fechada de 50 elementos de tubo [8].

2.6.2.7 - Duplex com incógnitas para um tubo

Nesta prova a rede neural utilizou todas as informações disponíveis para calibrar uma tubulação somente. A Figura 13 mostra com quadrados os resultados de uma tubulação só, e com losangos para todas as tubulações. É possível ver que a melhoria não é significativa nesse caso.

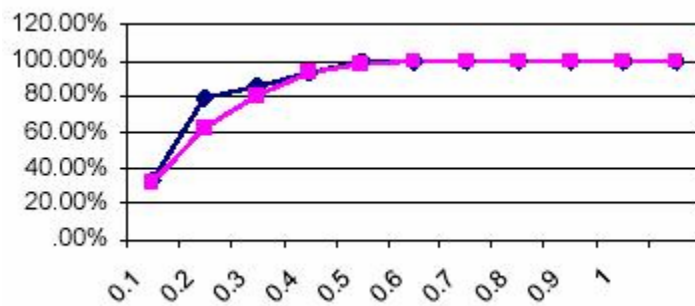


Figura 13: Resultado de rede fechada de 50 elementos de tubo [8].

2.6.2.8 - Agregação por zonas

A rede neural não tem entradas e saídas para cada tubo, e sim para cada zona. A partir de pressões em zonas, calcularam-se rugosidades em zonas. Isto não é suficiente para uma calibração definitiva, mas permitiria determinar automaticamente zonas problema para enfocar o esforço da calibração e detecção de problemas.

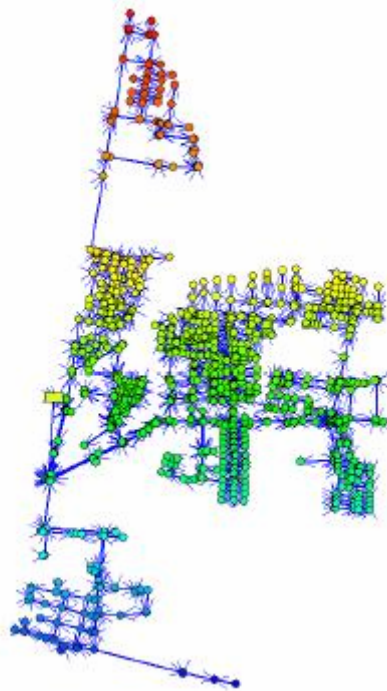


Figura 14: Rede de aqueduto calibrada de maneira agregada [8].

A Figura 14 mostra a rede de aqueduto utilizada. A Figura 15 mostra o treinamento da rede neural.

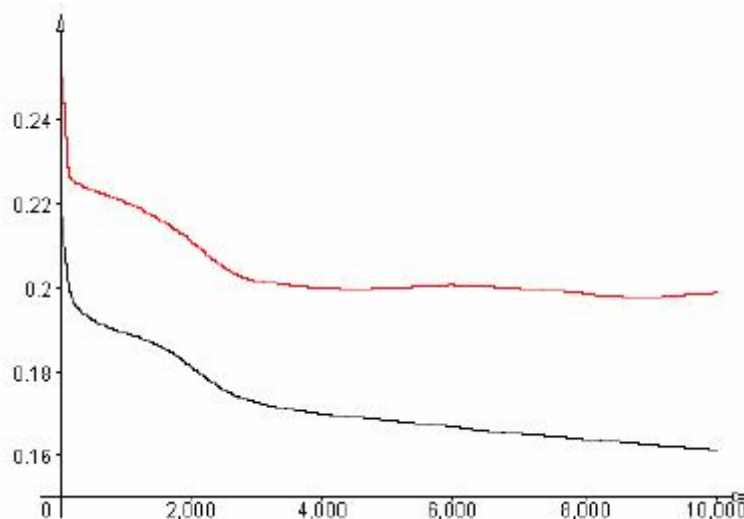


Figura 15: Aperfeiçoamento da rede neural sobre dados agregados [8].

A Figura 16 mostra que os resultados do experimento agregado são satisfatórios.

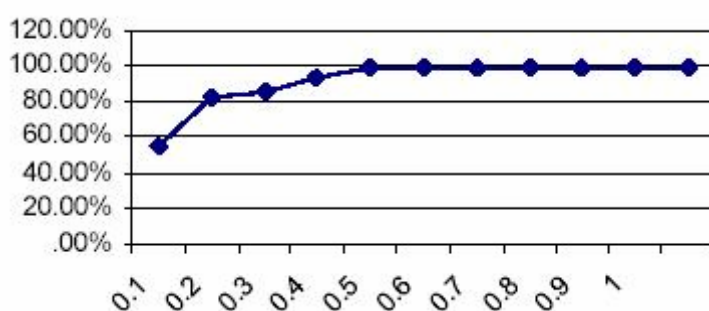


Figura 16: Resultados de rede agregada [8].

2.6.2.9 - Adicional 6H 36N SC

Nesta prova tentou-se calibrar uma rede de aqueduto de 7 tubos com uma rede neural com as seguintes características:

- Entradas: 5 Pressões + 7 Vazões = 12 Nós;
- Número de Saídas: 7 Rugosidades;
- 6 incógnitas de: 12 in x 3 = 36 nós;
- Interconexões totais de uma variável a outra;
- SHORTCUTS: Interconexão total de toda variável a toda variável;
- Função de ativação logística;
- Treinamento com Back Propagation.

O objetivo desta prova era determinar o quanto ajuda aumentar a complexidade da rede neural para a calibração do aqueduto.

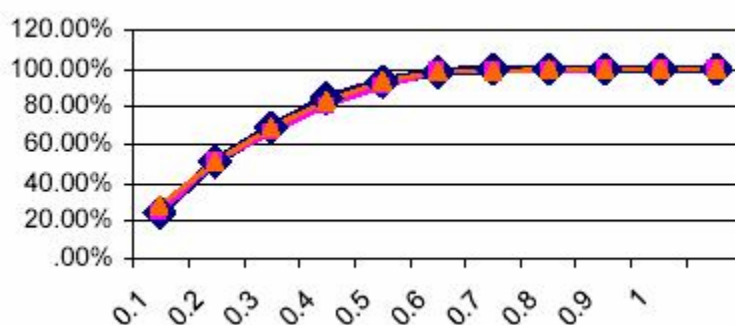


Figura 17: Resultados de prova adicional [8].

A Figura 17 mostra os resultados obtidos na prova atual e para as que já haviam sido realizadas com uma e com duas variáveis. Vê-se que o experimento não apontou qualidade à calibração.

2.6.3 – Sistemas Híbridos usando Redes Neurais

2.6.3.1 - Hipótese 1

Para o problema específico da calibração de rede de aqueduto, o problema pode ser considerado como uma rede neural com conjuntos de entradas e saídas idênticos aos do problema de calibração da rede de aqueduto.

Neste caso se podem implantar redes neurais de duas ou três variáveis, com conectividade total de uma variável à seguinte. A quantidade de nós da incógnita seria o número de entradas ou mais. A razão é porque se espera que a incógnita seja um ponto de combinação de todas as variáveis que conjuntamente levem ao cálculo de uma saída.

Assim, as variáveis de entrada da rede neural seriam:

- Variáveis de sistema: viscosidade, gravidade;
- Variáveis dos tubos: comprimento, diâmetro e material;
- Variáveis dos nós: demanda, topografia;
- Variáveis de fontes: energia disponível, topografia;
- Variáveis de bombas: equação de pressão – vazão, pressão mínima de trabalho;
- Variáveis de válvulas: tipo de válvulas, estado;

- Medições de campo: tipo de medição, objeto de rede medido, instante de tempo, valor da medição.

As variáveis de saída seriam:

- Variáveis de tubos: rugosidade, coeficiente de perdas menores;
- Variáveis de nós: coeficientes de fugas, expoente de fugas.

O treinamento da rede seria realizado a partir de dados teóricos nos quais se simulam o envelhecimento dos tubos e a aparição de fugas. Para o treinamento, são requeridos vários modelos teóricos simulando distintas condições hidráulicas, envelhecimento e fugas, sendo n o número de valores de entrada.

Este tipo de rede neural serviria para uma única rede de aqueduto. Frente a qualquer mudança topológica na rede, deve-se realizar um novo treinamento.

2.6.3.2 - Hipótese 2

A segunda hipótese de sistema de calibração de redes de distribuição de água potável com redes neurais consiste em minimizar o tamanho e complexidade da própria rede neural. Isto é possível porque este método só se utilizaria para uma rede de aqueduto, o que faz estática certa informação.

Neste caso as variáveis de entrada são unicamente as medições e a energia inicial. As saídas são as rugosidades e coeficientes de perdas menores dos tubos, os coeficientes e expoentes de fugas dos nós. Neste caso, requer-se ao menos uma incógnita, mas seria útil também provar com duas, porque, nos pesos das relações, se armazenará de alguma maneira a dependência com respeito ao resto de variáveis hidráulicas e topológicas.

Este tipo de rede neural serve somente para uma rede de aqueduto específica, com topologia e demandas constantes. Qualquer variação na rede de aqueduto nestas variáveis pode implicar um novo modelamento ou a reconstrução total da rede neural. Isto pode ocorrer caso mude o número de tubos ou medições porque, neste caso, já não serve a arquitetura neural inicial.

2.7 – Lógica Difusa [7]

A lógica difusa pode ser utilizada como um sistema de controle. Neste sistema as variáveis controladas são as hidráulicas: vazão e pressão. As variáveis de controle de campo

são as de calibração: rugosidade, coeficiente de perdas menores e coeficiente de fugas. O sistema difuso recebe as diferenças entre as variáveis hidráulicas calculadas e as lidas no campo. A partir desta informação, nota-se o quanto devem ser alteradas as variáveis de calibração.

O sistema trabalha com as diferenças, tanto em entrada quanto em saída, devido a ser esta a maneira como se realiza a calibração manual. A pessoa que realiza a calibração decide uma mudança sobre a rugosidade (ou outra variável de calibração), a partir da diferença percebida entre os valores teóricos observados. O processo se realiza iterativamente até que se considere calibrado o sistema, ou fisicamente impossível melhorar a calibração. Assim, o sistema difuso não calibra, somente faz melhoras que utilizadas iterativamente chegam a calibrar ao sistema hidráulico.

2.7.1 - O problema da calibração

A modelagem de redes de distribuição permite calcular as pressões e vazões de uma rede de distribuição de água potável a partir da informação de tubos e nós. É possível que algumas variáveis físicas mudem com a idade, diante disso o sistema de modelagem já não reproduz o que ocorre no campo. Estas variáveis devem então ser recalculadas. Isto pode ser feito a partir de medições em campo de pressões e vazões. É necessário então um sistema para obter as novas variáveis físicas a partir das medições hidráulicas. Isto é o que tentam fazer os sistemas de calibração (Figura 18).



Figura 18: Modelação e calibração de redes de distribuição de água potável [7].

Na realidade, o conceito de Lógica Difusa consiste na formulação de leis lógicas nas quais os valores de verdade das sentenças não se restringem a verdadeiro ou falso, podendo ter valores intermediários. O grau de pertinência de um conjunto difuso é um número entre 0 e 1. Se é 0 considera-se que o elemento não pertence ao conjunto; se é 1, pertence. Caso seja um valor intermediário, está relacionado com um grau proporcional de pertinência. Esta

função corresponde todos os elementos do espaço amostral a seu grau de pertinência ao conjunto.



Figura 19: Tipos de relações que podem ser estabelecidas com lógica difusa [7].

A lógica difusa permite estabelecer formalmente relações subjetivas que utilizam pessoas bem treinadas para controlar sistemas manualmente (Figura 19). Para isto toma-se o intervalo de valores de cada variável de entrada e saída e divide-se em subconjuntos que se completam. Posteriormente, define-se a função de pertinência para cada um destes subconjuntos. Desta maneira, passa-se de um intervalo quantitativo e preciso a um qualitativo e difuso. Estabelecem-se regras que relacionam as entradas com as saídas. Os conjuntos, as funções de pertinência e as regras são extraídos do conhecimento da profissional experiente ao realizar o processo manual.

No entanto, é nas regras onde se encontra de maneira mais direta o conhecimento deste profissional. As regras definem, para cada combinação de conjuntos de entrada, qual é a combinação de saídas correspondente.

Ao se obter valores específicos de entrada, estes pertencem difusamente aos conjuntos de entrada. Ao conectarem-se com as regras, suas saídas pertencem também difusamente aos conjuntos de saída. A resposta do sistema é obtida ao calcular o centróide dos conjuntos de saída difusos resultantes. Como exemplo pode ser observada a arquitetura montada para esta investigação em particular.

2.7.2 - Descrição do Sistema

Para o sistema de calibração se definem as seguintes variáveis de entrada:

- Diferença de pressão (modelo x campo)

- Diferença de vazão (modelo x campo)
- Velocidade de fluxo (modelo)
- Pressão (modelo)

E as seguintes variáveis de saída:

- Variação na rugosidade
- Variação do coeficiente de perdas menores
- Variação do coeficiente de fugas

As variáveis de entrada ΔQ e ΔP usam a definição de conjuntos que se mostra na Figura 20:

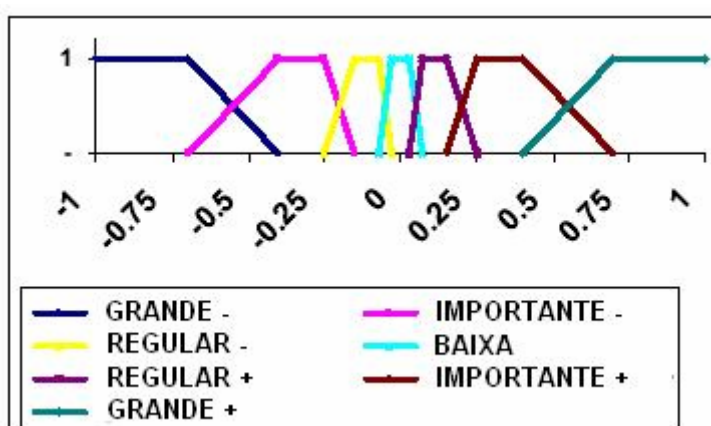


Figura 20: Conjuntos difusos (ΔQ e ΔP). As legendas correspondem a conjuntos da esquerda para a direita [7].

Observa-se para cada valor possível de ΔQ ou ΔP , o grau de pertinência aos conjuntos. Os conjuntos são independentes para cada variável, quer dizer, o conjunto GRANDE – da variável ΔQ não é o mesmo conjunto GRANDE – da variável ΔP .

A Figura 21 mostra a definição de conjuntos para a variável de entrada v (velocidade). A Figura 22 mostra a definição de conjuntos para a variável de entrada P (pressão).

A Figura 23 mostra a definição de conjuntos para as variáveis de saída: ΔK_s , ΔK_m e ΔC (variações na rugosidade, coeficiente de perdas menores e coeficiente de fugas).

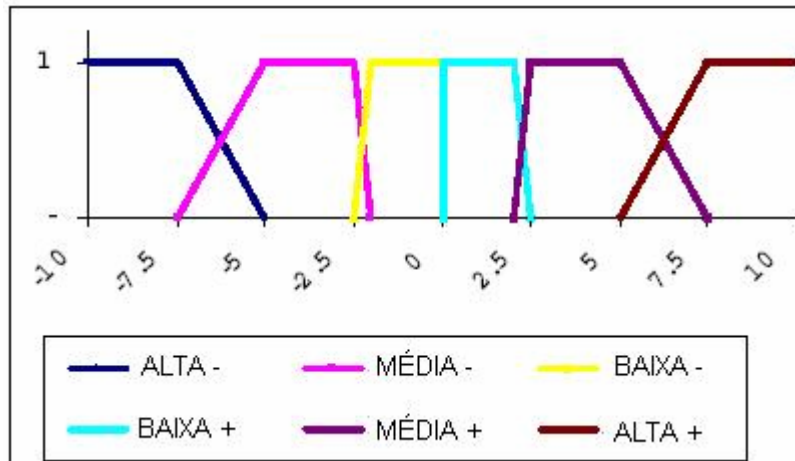


Figura 21: Conjuntos difusos (velocidade). As legendas correspondem a conjuntos da esquerda para a direita [7].

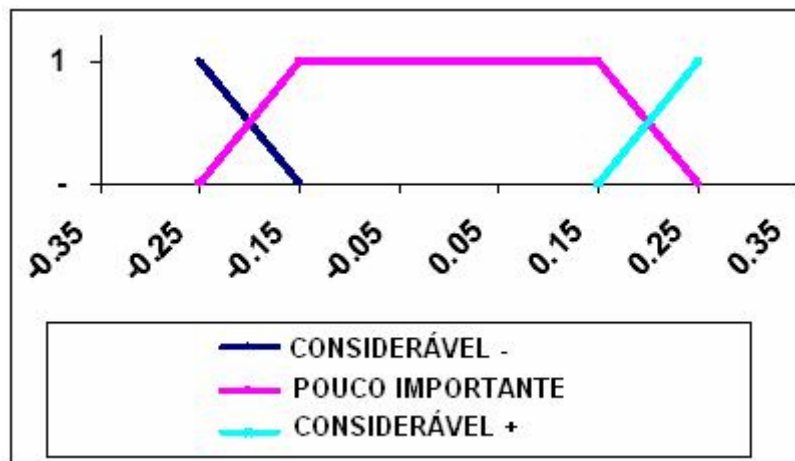


Figura 22: Conjuntos difusos (pressão). As legendas correspondem a conjuntos da esquerda para a direita.

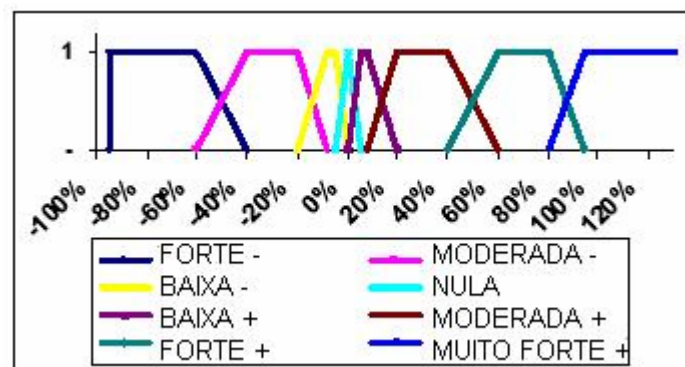


Figura 23: Conjuntos difusos (ΔK_s , ΔK_m e ΔC). As legendas correspondem a conjuntos da esquerda para a direita [7].

A Tabela 2 mostra uma das regras usadas para conectar os conjuntos de entrada com os conjuntos de saída:

	Variável	Conjunto
Entrada	velocidade	Baixa -
Entrada	ΔQ	Baixa
Entrada	pressão	Considerável +
Entrada	ΔP	Grande +
Saída	ΔK_s	Muito Forte +
Saída	ΔK_m	Forte +
Saída	ΔC	Nula

Tabela 2: Descrição de uma das regras do sistema difuso [7].

O sistema difuso deve estabelecer uma combinação de conjuntos de saída para cada possível combinação de conjunto de entrada. Por isso têm-se $7.7.6.3 = 882$ regras como as que se observa na Tabela 2. As regras estão desenhadas para serem utilizadas sobre uma linha de energia na que a medição de vazão é feita acima, e a medição de pressão é feita abaixo. A diferença relativa entre as variáveis hidráulicas é calculada da seguinte forma:

$$(\text{var calculada} - \text{var medida})/(\text{var medida}) \quad (49)$$

A resposta que ajusta o sistema difuso é a variação que se deve realizar sobre cada uma das variáveis de calibração de maneira percentual. Se:

VC: Variável de Calibração

SS: Saída do Sistema Difuso

NVC: Novo Valor de Variável de Calibração

Então:

$$NVC = (1+SS)*VC \quad (50)$$

Em [7] é descrito um exemplo de calibração por lógica difusa, além de explicitar vários testes variando-se o tipo de tubulação (simples ou em série) e variando-se os valores de vazão e pressão iniciais. Posteriormente, foi realizado um refinamento do sistema difuso diminuindo o intervalo dos conjuntos que implicam que o sistema já está calibrado ou quase calibrado. Estes conjuntos são:

Variáveis ΔP e ΔQ , conjuntos BAIXA

Variáveis ΔK_s , ΔK_m e ΔC , conjuntos NULA

Desta forma, aumenta-se a precisão a partir da qual o sistema difuso considera que é completada a calibração. Para tanto, este refinamento é feito para melhorar a precisão dos resultados de calibração. O sistema difuso se automatiza, mas as iterações são realizadas manualmente.

Observando os resultados apresentados em [7], é necessário tecer alguns comentários sobre o Método de Lógica Difusa: os resultados apresentados por esse método mostraram-se bastante parecidos com os alcançados com uma calibração manual; os resultados obtidos depois do refinamento são mais precisos, o que o tornou um experimento bem sucedido; o processo de calibração é guiado primordialmente pelo coeficiente de fugas; em alguns casos, as condições hidráulicas fazem com que seja fisicamente impossível a calibração de algum parâmetro (o sistema reconhece isto, calibra somente onde é possível e se detém); as variáveis hidráulicas (sobre as quais se mede a qualidade da calibração) às vezes flutuam durante o processo.

É notável o cuidado especial necessário com os pontos de medição de vazão que estejam acima e pontos de medição de pressão abaixo da linha de carga na rota. O sistema está desenhado para funcionar sob estas condições. Descumprir estas condições pode causar divergência do processo de calibração;

Quando a calibração por lógica difusa consiste em recuperação (diminuir vazão e aumentar a pressão), o sistema calibra até onde é possível. Isto é feito de maneira conservadora, lenta e com algumas irregularidades, mas converge até a melhor resposta possível. O sistema se comportou bem e de maneira consistente ao passar de tubos simples a tubos em série e a rotas estabelecidas em redes grandes. Com rotas é possível calibrar totalmente uma rede aberta e parcialmente uma rede fechada.

2.7.5 - Sistemas Híbridos

O problema de calibração também pode ser encarado como um sistema de controle em que as saídas do sistema controlado são as variáveis hidráulicas nos pontos onde existem medições em campo. As variáveis de controle são as rugosidades nos tubos, as perdas menores, os coeficientes e os expoentes de fugas. A idéia é levar as variáveis hidráulicas a valores próximos das medições, manipulando-as com as variáveis de controle.

As variáveis de controle não se manejam de maneira individual para cada tubulação. Cada variável de controle é uma variável topológica (ou sua variação) sobre um grupo. Por exemplo, uma variável de controle poderia ser a variação percentual na rugosidade de toda a tubulação de uma determinada subzona.

A definição dos grupos poderia ser feita de igual maneira que o algoritmo genético modificado. Entretanto, neste caso os grupos de maior utilidade são aqueles que definem rotas ou zonas.

Para estabelecer as regras e a malha de relações entre situações e regras, é requerida a ajuda de uma pessoa experiente em calibração e uma análise de sensibilidade das variáveis hidráulicas com respeito a mudanças nas variáveis de controle. Estes fatores são necessários também para estabelecer as funções de pertinência dos conjuntos.

Isto significa que o sistema de calibração é útil unicamente para a rede para qual foi desenhado. Caso se deseje calibrar outra rede, deve-se montar novamente o sistema difuso. Como as variáveis de controle são agregadas, cabe a possibilidade de que o sistema se comporte bem mesmo quando haja variações topológicas na rede, ainda que estas não sejam muito importantes.

Com este sistema difuso, e seguindo os passos do item 2.3, poder-se-ia realizar muito rapidamente uma calibração dado um conjunto de medições obtidas em campo, o que permitiria detectar em tempo real problemas na rede, zonas com fugas, etc.

2.8 – Algoritmos Evolutivos [6]

O método dos Algoritmos Evolutivos pode ser encarado mediante duas hipóteses distintas. A primeira estabelece que não há limite máximo para o tamanho da equação de evolução, enquanto que a segunda estabelece um limite para esta equação. As duas hipóteses serão melhor explicadas a seguir.

2.8.1 - Hipótese 1

Utilizando o método de evolução de algoritmos, é possível tentar encontrar uma equação que permita estimar fácil e rapidamente as variáveis de calibração. Para isto, constrói-se a estrutura exibida no gráfico da Figura 42, conhecida como diagrama de classes. Este diagrama permite definir a estrutura das equações, além de proporcionar uma

interpretação como um desenho de base de dados. Então, as tabelas dessa base de dados podem ser interpretadas como elos de DNA cujas filas correspondem a cromossomos e cada registro é um gene. Isto pode ser útil em sua implementação.

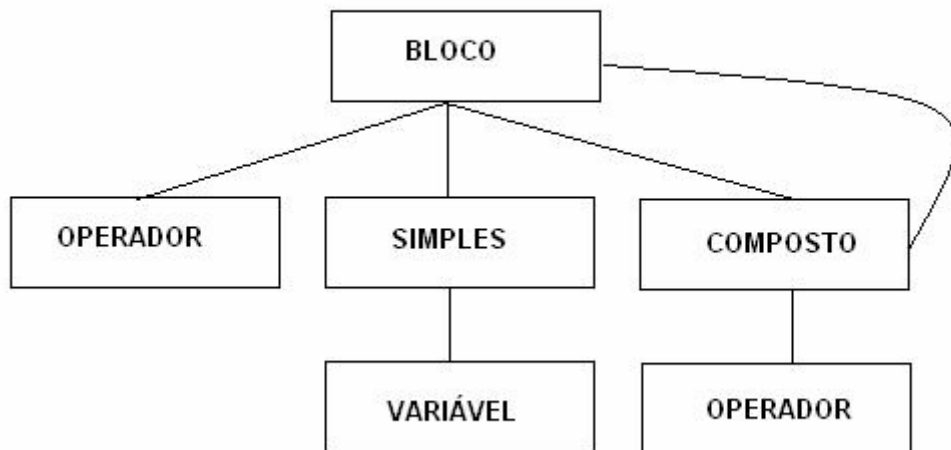


Figura 24: Estrutura de dados [6].

A Figura 24 pode ser interpretada da seguinte forma: uma equação é um bloco; um bloco pode ser um valor constante, uma variável ou uma operação entre dois blocos. No caso do bloco ser uma constante, seu valor é definido; no caso de ser uma variável, define-se qual é a variável, obtida de uma tabela onde se encontram todas; caso seja uma operação, obtém-se o operador de outra tabela. Os dois blocos são obtidos como referências à mesma tabela de blocos. Esta estrutura permite definir qualquer operação. O próximo passo é, de maneira aleatória, adicionar novos blocos com estrutura e valores aleatórios.

O sistema de seleção funciona da seguinte maneira. Dado um indivíduo (possível solução), representado em um conjunto de tabelas (elos), deve-se interpretar como equação, avaliar a equação, compará-la com o resultado conhecido e qualificar o indivíduo. A equação deve ser avaliada perante diversas condições das variáveis de entrada.

O processo de geração de novos blocos (Figura 25) inicia decidindo de maneira aleatória caso se trate de um bloco variável, constante ou composto. Caso seja um bloco variável, escolhe-se aleatoriamente uma das variáveis do sistema. Caso seja um bloco constante, escolhe-se também de maneira aleatória um número dentro de um intervalo predefinido com distribuição de probabilidade uniforme.

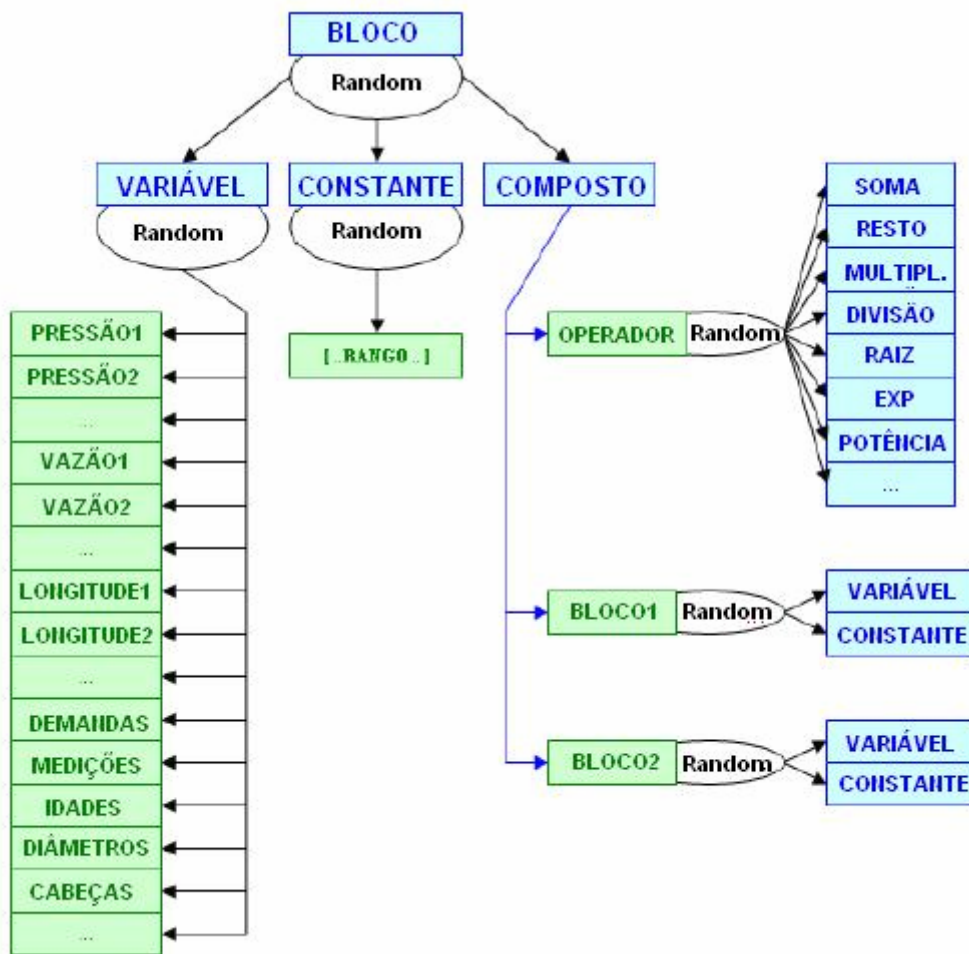


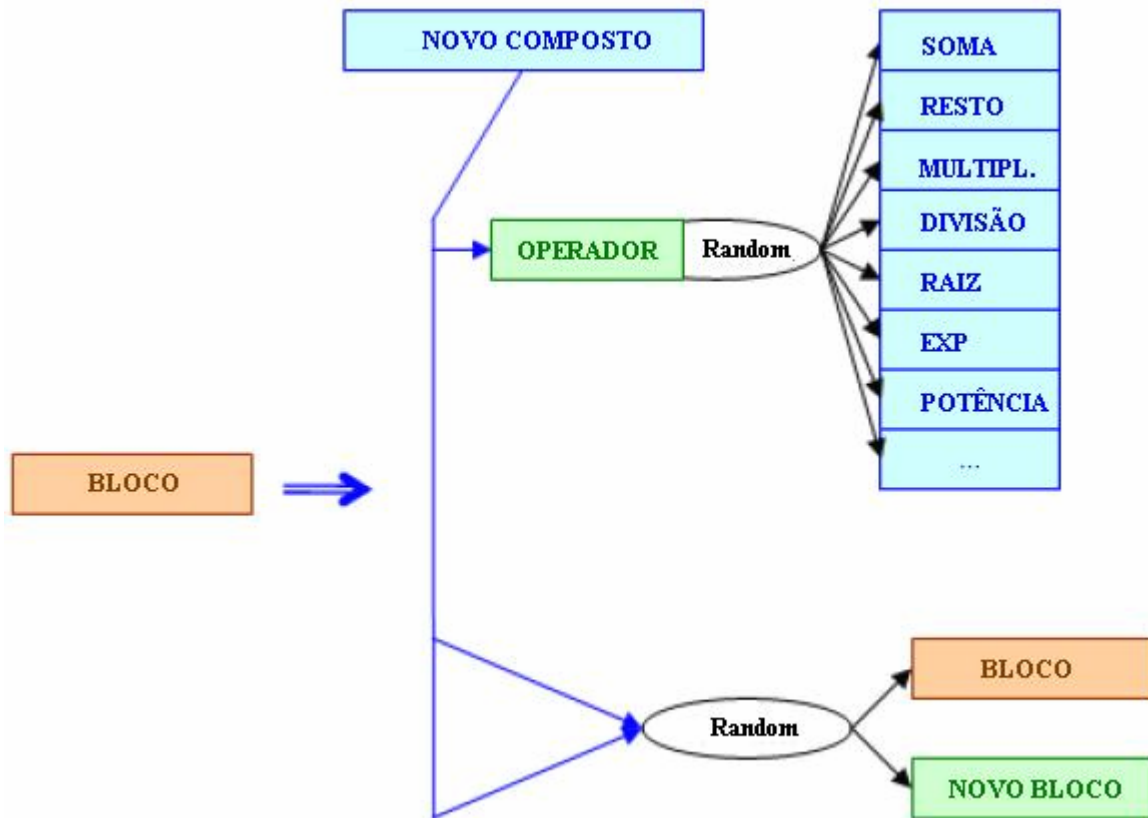
Figura 25: Geração de um bloco [6].

No caso de ser um bloco composto, escolhe-se aleatoriamente um operador e logo geram-se novos blocos que são os operadores. Estes novos blocos são criados como constantes ou variáveis, sem a possibilidade de que sejam compostos. Isto é feito para truncar o processo de geração de um bloco, evitando que chegue a um tamanho muito grande.

O esquema de mutação de um bloco pode ser observado na Figura 26. É mostrado primeiro o caso dos blocos simples (variáveis ou constantes). Cria-se um novo bloco composto, no qual um dos operadores é um bloco simples. O operador e a posição dos operadores são escolhidos aleatoriamente. O outro operador é gerado com o processo descrito anteriormente.

Na mutação de um bloco composto existem várias opções: a primeira é fazer o mesmo que no caso de dois blocos simples: criar um novo bloco composto e fazer do bloco original um de seus operadores. Uma segunda opção consiste em modificar aleatoriamente o operador. Outra opção é modificar somente um ou ambos os operadores do bloco original. A última opção consiste em inverter a ordem dos operadores. Em ambos os casos (blocos

simples e compostos), o processo de mutação também permite certo nível de probabilidade para deixar o bloco em seu estado original.



Figuras 26: Mutação de um bloco variável ou constante [6].

O processo de reprodução ocorre da seguinte maneira: a reprodução entre n equações consiste simplesmente em uni-las com operadores; soma-se a primeira com a segunda e o resultado é somado com a terceira; o resultado desta última operação é somado com a quarta, e assim sucessivamente.

O processo de evolução não é igual ao utilizado no método dos Algoritmos Genéticos. Neste caso, depois do processo de reprodução, é possível ter indivíduos que não são produtos da reprodução de outros, e sim apenas mutações de outros. Além do mais, os indivíduos sobreviventes (equações escolhidas a cada iteração) são escolhidos entre as duas últimas gerações, não só da última.

Estas variações do algoritmo realizam-se devido ao fato de ser bastante difícil encontrar uma nova equação adequada, além de ser difícil também melhorá-la através de mutações. Então, deseja-se que os bons indivíduos sobrevivam através do processo, até que apareçam outros que os melhorem significativamente.

Finalmente, poder-se-ia realizar uma calibração sobre as constantes da equação final. Esta última calibração pode ser executada com o algoritmo genético básico.

2.8.2 - Hipótese 2

Uma segunda hipótese diz que cada equação possível tem um tamanho máximo fixo. Assim pode-se estabelecer que a cadeia de DNA tenha um tamanho fixo para qualquer indivíduo em todas as gerações, permitindo também a utilização do algoritmo genético básico.

Cada equação possível é descrita como uma árvore binária de n níveis, sendo n uma quantidade fixa para todo o processo. Esta árvore terá então $2^n - 1$ nós em cada nível e $2n - 1$ nós no total (Figuras 27 e 28).

Cada nó contém um operador, uma variável (pressão1, longitude3, etc.) ou um valor constante. As folhas (nós do último nível) não podem conter operadores. A cadeia genética é uma lista de $2^n - 1$ valores. Esta cadeia genética pode evoluir com o algoritmo genético básico. O único processo que se modifica é o de seleção.

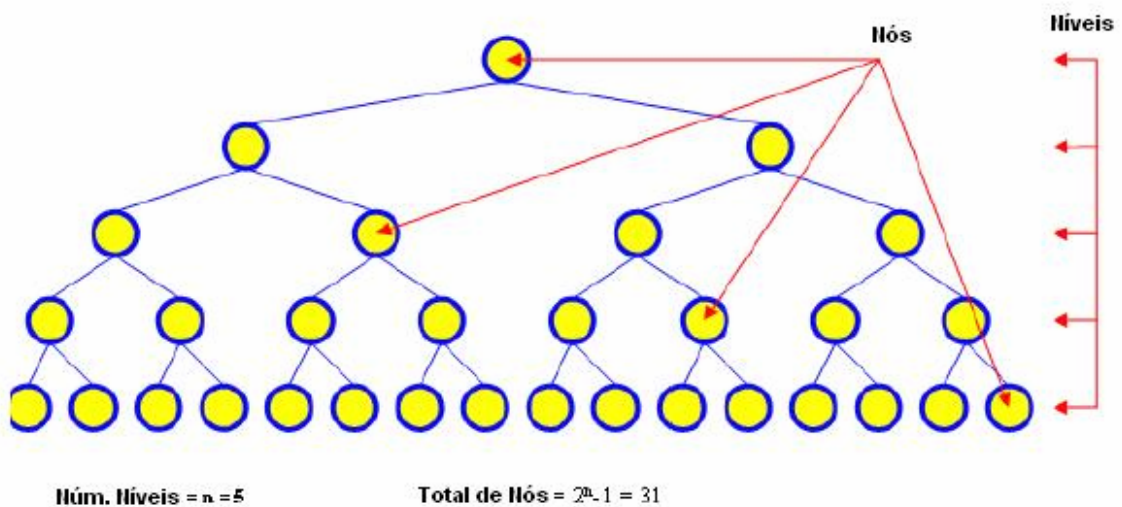


Figura 27: Árvore binária para representar a equação [6].

Para avaliar um indivíduo (uma equação), deve-se analisar a árvore de baixo ao topo. Nos nós em que se encontram as variáveis, devem ser alocados os valores correspondentes no exemplo dado (por exemplo, pressão2 = 34,5, etc.). Nos nós em que se encontram os operadores, substituem-se os operadores pelos resultados das operações indicadas, entre seus sub-nós associados. Ao se chegar ao nível superior, encontra-se o resultado da equação para a variável que está sendo calibrada.

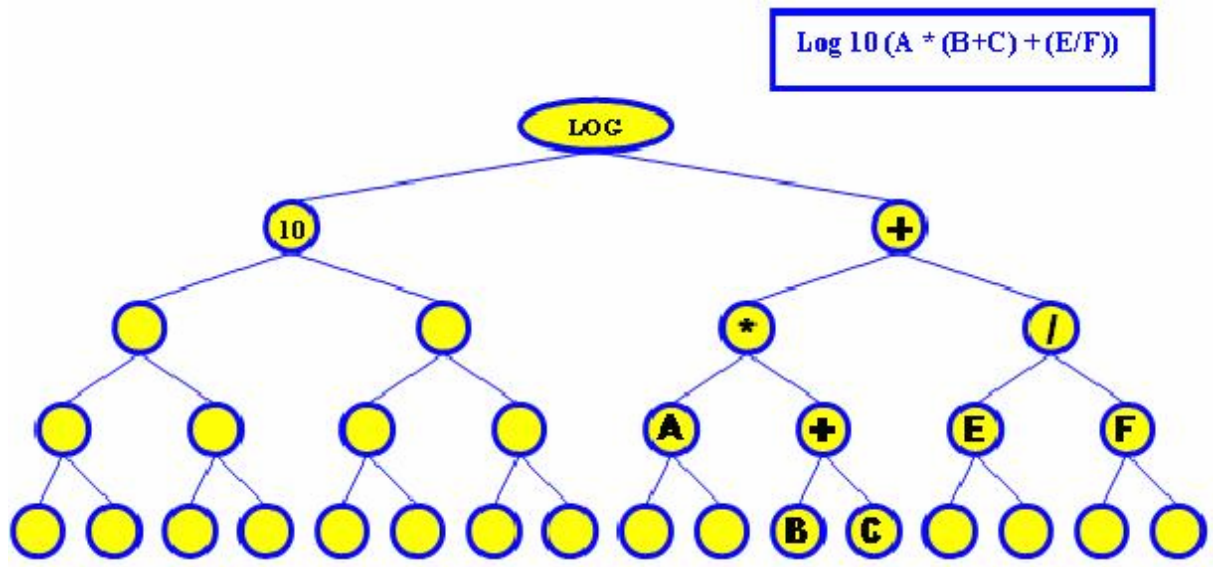


Figura 28: Exemplo de representação de uma equação em árvore [6].

3 Análise dos Métodos e Comparação entre eles

Devido ao fato de só poder ser aplicado a redes muito simples e de requerer cálculos mais simples e rápidos, o Método dos Seccionamentos Fictícios leva vantagem sobre os mais apurados para resolver redes de menor complexidade. É devido a essa sua característica que o seu ensino ainda merece relevância, pois é desnecessário e até anti-econômico dispor-se de tempo de cálculo e de modelos bastante complexos para redes de menor relevância. Já as desvantagens deste método estão na sua limitação de atuação.

O método de Hardy-Cross de iteração de vazões tem velocidade de convergência maior que o do seccionamento fictício. É necessário ser feita distribuição de valores de partida para vazões nas tubulações satisfazendo as equações de continuidade em todos os nós. Este fator imputa na velocidade e na eficiência do método aspectos de características do projetista, pois quanto mais experiente for o projetista, melhor será sua estimativa inicial das vazões e mais rápida será a convergência do método.

Este segundo método estudado também possui limitação quanto à quantidade de redes que ele pode ser útil, já que consegue resolver apenas redes malhadas.

O Método Nodal de Iteração de Pressões tem velocidade de convergência menor que o anterior, mas possui a vantagem de poder receber um volume maior e mais diverso de condições de contorno que o método de Hardy-Cross, de iteração de vazões. Ademais, é menos limitado devido ao fato de resolver redes mistas (redes fechadas e com ramificações simples).

O Método Nodal com Convergência pela Técnica de Newton-Raphson é o que mais rapidamente converge, dentre os chamados métodos clássicos, pois, enquanto os métodos que efetuam iterações de vazão e pressão realizam suas iterações em uma equação de cada vez, este método o faz em todo o sistema de equações representativo da rede. Entretanto, como desvantagem, caso implementado em um programa computacional, este método requer uma memória maior, embora esta não seja uma desvantagem muito importante nos dias atuais em que há um desenvolvimento enorme dos meios computacionais.

Como vantagens adicionais de operacionalidade, não é necessário distribuir-se vazões nas tubulações. E ainda é possível ser feita uma análise de sensibilidade da rede, que pode ser de especial utilidade em análises de redes em tempo real. Este método pode resolver redes mistas.

Outra grande vantagem desse método sobre os anteriores é o fato de ele permitir incorporar às redes bombas, válvulas e hidrantes através de suas equações paramétricas e, além desses acessórios, tubulações pertencentes a regiões ramificadas da rede. Possibilita determinar os coeficientes de Hazen-Williams das tubulações e assim conhecer seus estados (envelhecimento), determinar pressões de nó, o que permite grande maleabilidade. Caso instrumente-se a rede adequadamente, pode-se analisar redes operando em tempo real, o que o aproxima até dos métodos de inteligência artificial.

Uma limitação deste método está no fato deste ser baseado na resolução de um sistema de N equações nodais com N incógnitas pela rede sem concentrá-las em pequenas regiões, para que a rede seja solúvel. Caso todas (ou muitas das) incógnitas estejam localizadas em uma região pequena da rede, a mesma pode não ser solúvel. Não há regras rigorosas que permitam determinar se uma rede é solúvel ou não. Caso haja uma ou mais filas (linhas ou colunas) com todos os elementos nulos na matriz dos coeficientes, não haverá solução única para a rede. Uma fila de elementos nulos surge quando não há incógnitas na equação da continuidade de um nó. Assim, conclui-se que deve haver pelo menos uma incógnita na equação da continuidade de cada nó da rede. Seguir essa regra evita a causa mais comum de insolubilidade das redes, entretanto não garante a solubilidade.

Caso diâmetros ou coeficientes de Hazen-Williams de tubulações sejam desconhecidos ou haja bombas na rede, a solubilidade não é garantida. Essas dificuldades são superadas na prática, partindo-se de boas estimativas iniciais para as incógnitas.

Sendo necessário resolver a rede para condições levemente diferentes, a quantidade de cálculos é largamente reduzida se são utilizados os valores de uma solução como valores de partida para a rede levemente diferente, outra grande vantagem.

Por tudo o que foi exposto até então, é notável que este método mereça maior destaque por parte de professores e estudantes, sendo ideal para resolução de projetos, caso utilizado em um programa de computador.

Para o problema de calibração de redes, devem ser feitas considerações um pouco diferentes das feitas até agora, devido à maior complexidade deste problema e das redes que ele se propõe a resolver. Todos os métodos de calibração são bastante sensíveis a pequenos erros e são sistemas complexos de alta precisão, por isto recomenda-se sempre o uso de equações fisicamente baseadas em vez de equações empíricas no sistema hidráulico. A dificuldade matemática introduzida pelas equações fisicamente baseadas é agora uma trivialidade, superada com sobras pela complexidade dos sistemas de inteligência artificial.

Adicionalmente, as ferramentas de computação mais atuais permitem superar as dificuldades das equações fisicamente baseadas sem maiores problemas. Tentar realizar processos de calibração em redes de aqueduto complexas, reais, com mais de 1000 tubos utilizando equações empíricas, não tem sentido.

Neste contexto de bastante complexidade dos problemas, o surgimento dos métodos que fazem uso de inteligência artificial veio ao encontro das necessidades mais atuais. Estes métodos têm apresentado um bom potencial na resolução deste tipo de problema, embora ainda necessitem de muito estudo para serem realizadas melhorias. Dentro dos métodos de inteligência artificial existe uma grande quantidade de combinações e formas de utilização. Estas abrangem uma área ampla de investigação para descobrir novos métodos rápidos e eficazes para resolver o problema da calibração.

Atualmente a metodologia dos algoritmos genéticos é a de maior uso no problema de calibração. Em redes pequenas e com modelações estáticas, tem mostrado uma grande efetividade e eficiência. Isto ocorre porque neste tipo de redes consegue-se calcular muito rapidamente as variáveis hidráulicas. Entretanto, em redes grandes (mais de 1000 elementos de tubo) e com modelações dinâmicas amplas (por exemplo, tomada de resultados e/ou medidas a cada 5 minutos durante uma semana), o algoritmo é extremamente lento.

As redes neurais também são bastante utilizadas na solução do problema de calibração. Se a rede neural já está calibrada, o algoritmo é muito rápido. Mas, se alguma variável topológica da rede chega a mudar, deve-se calibrar a rede neural novamente. O processo de calibração da rede neural em redes grandes e com modelações dinâmicas amplas, requer muito mais tempo de cálculo que o algoritmo genético.

Em muitos casos, as redes neurais treinadas com casos críticos ou importantes são capazes de fazer validação sobre os casos intermediários ou combinados, embora esta não faça parte da abordagem deste trabalho. Do que foi exposto anteriormente sobre o assunto, foi possível notar que o treinamento com rugosidades discriminadas, validando com rugosidades combinadas de maneira aleatória, não teve bons resultados.

Já o do tipo duplex, ainda que não seja totalmente satisfatório, é uma melhora considerável. O processamento do tipo duplex permite ter precisão semelhante à do experimento de treinamento e validação discriminados, com a vantagem de trabalhar com um caso real (rugosidades combinadas) e não com um caso totalmente acadêmico (rugosidades discriminadas).

Ao se realizar experiências com redes neurais tipo duplex, as redes de aqueduto maiores têm melhores estatísticas de calibração, pois o maior grau de liberdade destas redes

causa um comportamento hidráulico mais uniforme e previsível. Os resultados apresentados permitem supor que eventualmente pode-se chegar a configurar redes neurais que calibrem com muita precisão as redes de distribuição de água potável com rugosidades combinadas.

Ao utilizar duas variáveis nas redes neurais com experimentação tipo duplex, observou-se melhoria nas redes pequenas. Possivelmente isto ocorre porque as duas variáveis compensam a rigidez (menos graus de liberdade) das redes pequenas. No entanto, nas redes medianas, a segunda variável parece introduzir somente ruído.

Existem provas nas quais os melhores resultados são obtidos com as redes de aqueduto abertas; em outras provas, com as fechadas; em outras provas com as grandes; etc. Eventualmente seria possível utilizar um sistema intermediário (híbrido) que decida qual rede neural utilizar para aperfeiçoar o desempenho.

Quando se usa toda a informação da rede para calibrar um só tubo, obtêm-se melhores resultados nas redes fechadas. Esta afirmação pode ser feita porque nas redes abertas estão registradas muitas informações inúteis (a de caminhos totalmente alheios ao tubo que se está calibrando).

As redes neurais que calibram um só tubo a partir da informação de toda a rede, não são uma melhora sobre as redes neurais que calibram toda a rede. No melhor dos casos, apresentam o mesmo resultado. Possivelmente, o processamento e calibração sobre todo o aqueduto permitem à rede neural capturar melhor as generalidades do problema hidráulico.

Ao utilizar a rede neural para calibrar dados agregados obtiveram-se bons resultados. Em geral, poderia ser utilizado este tipo de redes para detectar as zonas problema sobre as quais devem ser feitas calibrações mais detalhadas. Outro detalhe relevante é o fato de que o uso de variáveis múltiplas na rede neural não parece melhorar o sistema.

Em geral, as redes neurais podem ser usadas para obter calibrações prévias ou guias para uma calibração manual, mas são insuficientes como única ferramenta de calibração.

Este Método de Calibração por Redes Neurais mostra-se bastante promissor, podendo ser uma ferramenta muito poderosa no futuro para se calibrar redes bastante complexas.

Quanto ao método de lógica difusa, pode-se dizer é o método mais próximo da calibração manual, pois depende muito do operador, com iterações não automatizadas. Embora não consiga calibrar totalmente redes fechadas, em geral, o sistema de calibração com lógica difusa é satisfatório. Possivelmente é o caminho correto para chegar a um sistema eficiente e determinístico de calibração de redes de distribuição.

Devido ao fato de que cada metodologia de inteligência artificial tem algumas vantagens e algumas desvantagens, são levantadas algumas hipóteses sobre possíveis métodos para resolver o sistema de calibração utilizando sistemas híbridos. Por sistema híbrido se entende aquele que utiliza a combinação de dois ou mais sistemas de inteligência artificial para resolver um problema.

4 Análise do software CRedes 2001

O software CRedes 2001 foi utilizado no dimensionamento das redes de abastecimento de água apresentadas nos Apêndice A e B. Após a realização de tais dimensionamentos foi possível fazer uma avaliação do uso de tal ferramenta.

Como dados de entrada, o programa aceita plantas em formato eletrônico, com uma extensão compatível com um dos softwares mais utilizados por projetistas civis, o AutoCad. A partir dessas plantas, em que devem estar representados as curvas de nível, o arruamento e as cotas de vários pontos, é possível criar a rede desejada, com quantos elementos de nós e tubos forem necessários.

Em cada elemento de nó é possível estabelecer cinco diferentes tipos de condição de contorno, de forma que o nó se apresente como: um reservatório, um ponto concentrador da vazão da área de influência, uma válvula de controle, uma válvula redutora de pressão ou um “booster” em linha. Desta maneira, é possível dimensionar uma rede complexa, com várias alternativas de adequação da rede aos critérios estabelecidos pelas normas brasileiras, como a obediência à velocidade mínima e máxima, à carga mínima e máxima, etc.

Para os elementos de tubo é possível adotar uma tubulação de PVC com um dos diâmetros comerciais (entre 100mm e 350mm).

É facultada ao usuário a opção de realizar os cálculos de vazões que passam pelos tubos através da Fórmula Universal ou pela Fórmula de Hazen-Williams. Escolhidos os diâmetros dos tubos é realizado o cálculo das vazões. Caso o usuário não deseje escolher o diâmetro de alguns tubos, o programa fornece um valor de diâmetro que satisfaça às condições de bom funcionamento da rede.

Os resultados dos cálculos realizados pelo programa são apresentados tanto na forma gráfica como em planilhas. São indicados os nós e tubos que não apresentam as condições aceitáveis de funcionamento. Isto facilita a decisão a ser tomada pelo usuário para adequar a rede.

A qualquer momento é permitido ao usuário modificar o desenho da rede, criando, removendo ou deslocando elementos de nós e de tubos. Um dos destaques deste programa é a facilidade e a praticidade com que são realizadas alterações gráficas.

O banco de dados do CRedes é bastante completo, embora apresente primordialmente produtos da marca Tigre. São apresentadas as especificações mais relevantes de cada produto, como, por exemplo, curvas características de bombas, valor de abertura

padrão das válvulas de controle, etc. Estas especificações podem ser alteradas a critério do usuário.

Um módulo bastante útil do CRedes é o de orçamento, no qual é realizado o levantamento dos principais serviços a serem executados, bem como a volumetria dos materiais. Obviamente é necessário entrar com o valor unitário dos serviços. Embora este módulo não tenha sido utilizado no dimensionamento das redes apresentadas nos Apêndices A e B, vale ressaltar a enorme ajuda na fase de análise de custo de implantação da rede. Vale ressaltar que este orçamento serve apenas como embasamento, devendo-se realizar uma análise criteriosa para identificar as dificuldades apresentadas no campo.

No software não está especificado o método de cálculo utilizado, entretanto, por suas características de rápida convergência de cálculos, possibilidade de resolução de redes mistas e de adoção de diferentes tipos de condições de contorno, é possível inferir que o referido programa utilize o método nodal de convergência por Newton-Raphson.

No Apêndice C é desenvolvido um guia de uso do CRedes, de forma mais simplificada que a apresentada no manual que acompanha o software, com explicação dos passos e das funções necessárias para a elaboração de um projeto que atenda ao escopo do curso de HID-44.

No Apêndice D é resolvida uma rede pelo método de Hardy-Cross e pelo programa para testar a eficiência do software em estudo.

5 Conclusão

Após o término deste trabalho é preciso que sejam feitas algumas considerações. Os dois primeiros métodos que foram explicados ainda se mostram bastante importantes na compreensão do funcionamento do dimensionamento de redes de água e na solução de pequenos projetos (ideais para a fase de aprendizagem), principalmente quando não se dispõe de ferramentas computacionais.

Dos dois outros métodos considerados clássicos (nodal com convergência por iteração de pressão e nodal com convergência por Newton-Raphson), o segundo mostra-se mais importante, tanto pela velocidade de convergência como pela quantidade de condições de contorno que pode trabalhar. No entanto, por requerer cálculos matemáticos mais elaborados e cansativos, deve ser lecionado de forma a transmitir-se apenas os seus fundamentos, sendo que os cálculos devem ser realizados por programas, como o CRedes 2001.

No caso dos outros quatro métodos que fazem uso de inteligência artificial, estes métodos não se mostram completamente desenvolvidos e maduros atualmente, necessitando de estudos que melhorem a eficiência de tais métodos. No entanto, é de fundamental importância que os futuros engenheiros tenham idéia dos rumos que têm tomado o estudo das redes de abastecimento de água. Isto é importante para estar sempre atualizado e para mostrar que o estudo deste assunto não se apresenta de forma estática e está sempre evoluindo.

O software desenvolvido pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica da USP mostrou-se uma ferramenta rápida e de grande auxílio no dimensionamento de redes de água potável. Deve ser um importante aliado ao estudante de Engenharia no decorrer do aprendizado, pois permite que tenha uma visão mais rápida e esclarecedora de vários instrumentos (como as válvulas, as bombas, etc.) quando utilizados em conjunto em uma rede.

Referências Bibliográficas

1. GARCEZ, L. N., **Elementos de Engenharia Hidráulica e Sanitária**, Editora Edgard Blücher Ltda., 1974.
2. VINAGRE, M. V. A., **Estudo de Redes de Abastecimento de Água**, Trabalho de Graduação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 1982.
3. POHLHEIM, H., **GEATbx: Genetic and Evolutionary Algorithm Toolbox for use with MATLAB**, 2004. Disponível em: <www.geatbx.com>. Acesso em: 21 set. 2005.
4. VENDRAME, I. F., **HID-44: Saneamento**, Apostila, ITA.
5. SALDARRIAGA, J. G.; CAMARGO, A. S., **Análisis de parámetros para la calibración de redes de tuberías con algoritmos genéticos**. In: XXI CONGRESO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, São Paulo, 2004.
6. SALDARRIAGA, J. A.; SALAS, D. E.; GÓMEZ, R., **Aplicabilidad de métodos de inteligencia artificial a la calibración de redes de distribución de agua potable**, In: XXI CONGRESO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, São Paulo, 2004.
7. GÓMEZ, R.; SALAS, D. E.; SALDARRIAGA, J. A., **Calibración de redes de distribución de agua potable con lógica difusa**, In: XXI CONGRESO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, São Paulo, 2004.
8. SALAS, D. E.; SALDARRIAGA, J. A.; GÓMEZ, R., **Calibración de redes de distribución de agua potable utilizando redes neuronales con diferentes configuraciones e niveles de agregación**, In: XXI CONGRESO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, São Paulo, 2004.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR-12211 – Estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água**, São Paulo, 1992.
10. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR-12218 – Projeto de rede de distribuição de água para o abastecimento público**, São Paulo, 1994.
11. FCTH, **Manual do Usuário – CRede**, USP, 2001.

Apêndice A

Com o software CRedes 2001 foi realizado um projeto de dimensionamento de rede de distribuição de água potável de uma determinada região da cidade de São José dos Campos. Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 e A.6.

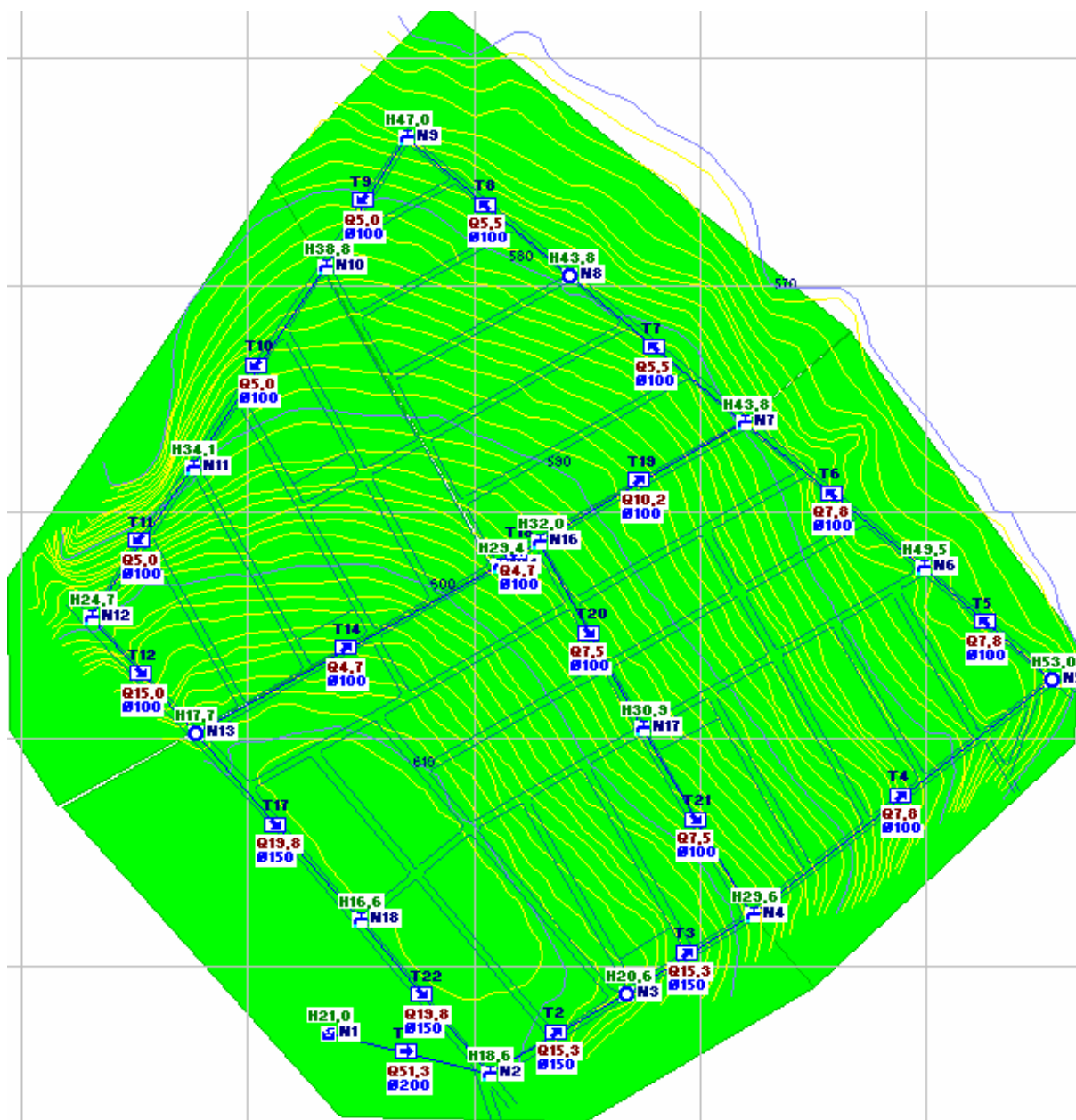


Figura A.1: Planta da região de projeto, apresentando as curvas de nível, arruamento, desenho da rede, vazões, cargas piezométricas e diâmetro das tubulações.

Nó Inicial	Nó Final	Ext.Planta (m)	Nome do Trecho	Ext.Calc. (m)	DN (mm)	Diâm.Ext. (mm)	Espessura (mm)	Situação	Crit.Interp.
N1	N2	145,94	T1	145,94	200	222	8,90	Rede Projetada	Global
N2	N3	140,58	T2	140,58	150	170	6,80	Rede Projetada	Global
N3	N4	131,45	T3	131,79	150	170	6,80	Rede Projetada	Global
N4	N5	336,45	T4	337,41	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N5	N6	151,20	T5	151,22	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N6	N7	203,67	T6	203,72	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N7	N8	201,12	T7	201,12	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N8	N9	189,20	T8	189,24	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N9	N10	134,86	T9	135,13	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N10	N11	212,13	T10	212,19	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N11	N12	160,16	T11	160,46	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N12	N13	138,05	T12	138,63	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N13	N14	306,15	T14	306,41	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N14	N16	41,02	T18	41,11	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N16	N7	209,55	T19	210,02	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N16	N17	188,23	T20	188,24	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N17	N4	191,28	T21	191,29	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N13	N18	219,14	T17	219,14	150	170	6,80	Rede Projetada	Global
N18	N2	177,32	T22	177,32	150	170	6,80	Rede Projetada	Global

Figura A.2: Descrição e especificações dos elementos de tubos da rede.

Nó	Coord. N (m)	Coord. E (m)	Cota Terr. (m)	Cota Nó (m)	k Local	P min. (mca)	P max. (mca)	Situação	Contorno	Valor	Grandeza
N1	-1059,95	71,01	609,000	607,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Reservatório	630,000	NA(m)
N2	-1095,00	212,68	610,000	608,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	16,181	Vazão(l/s)
N3	-1024,90	334,54	607,500	606,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N4	-954,81	445,75	598,040	596,536	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	0,000	Vazão(l/s)
N5	-747,59	710,81	572,561	571,061	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N6	-648,55	596,56	575,100	573,598	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	0,000	Vazão(l/s)
N7	-520,56	438,13	579,560	578,056	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	12,519	Vazão(l/s)
N8	-391,04	284,27	578,900	575,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N9	-269,15	139,56	575,000	570,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	10,566	Vazão(l/s)
N10	-383,43	67,96	583,590	580,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	0,000	Vazão(l/s)
N11	-560,18	-49,33	588,880	587,375	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	0,000	Vazão(l/s)
N12	-692,74	-139,21	598,740	597,239	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	10,027	Vazão(l/s)
N13	-794,83	-46,29	608,649	607,149	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N14	-647,03	221,82	596,130	594,633	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	0,000	Vazão(l/s)
N16	-625,70	256,86	593,470	591,967	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	2,000	Vazão(l/s)
N17	-790,25	348,25	595,640	594,141	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	0,000	Vazão(l/s)
N18	-959,39	98,43	611,000	609,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	0,000	Vazão(l/s)

Figura A.3: Descrição e especificações dos elementos de nós da rede.

Nó Inicial	Nó Final	Extensão (m)	Nome do Trecho	Material	Tipo de Superfície	Tipo de Escoramento
N1	N2	145,94	T1	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Descontínuo
N2	N3	140,58	T2	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Descontínuo
N3	N4	131,79	T3	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Pontaletes
N4	N5	337,41	T4	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Pontaletes
N5	N6	151,22	T5	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Pontaletes
N6	N7	203,72	T6	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Pontaletes
N7	N8	201,12	T7	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Especial
N8	N9	189,24	T8	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Metálico e Madeira
N9	N10	135,13	T9	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Metálico e Madeira
N10	N11	212,19	T10	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Especial
N11	N12	160,46	T11	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Pontaletes
N12	N13	138,63	T12	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Pontaletes
N13	N14	306,41	T14	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Pontaletes
N14	N16	41,11	T18	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Pontaletes
N16	N7	210,02	T19	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Pontaletes
N16	N17	188,24	T20	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Pontaletes
N17	N4	191,29	T21	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Pontaletes
N13	N18	219,14	T17	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Descontínuo
N18	N2	177,32	T22	PVC Tigre Vinilifer DEFOFo	Sem revestimento	Descontínuo

Figura A.4: Planilha de quantitativos.

Nó	Coord. N (m)	Coord. E (m)	Área (ha)	Área Planta (ha)	Tx.Pop. (hab/ha)	Consumo (l/hab/dia)	k1	k2	Perdas (%)	Vazão (l/s)
N1	-1059,95	71,01								
N2	-1095,00	212,68	19,417	19,417	200	200	1,50	1,20	0,0	16,181
N3	-1024,90	334,54								
N4	-954,81	445,75	0,000	0,000	0	200	1,50	1,20	0,0	0,000
N5	-747,59	710,81								
N6	-648,55	596,56	0,000	0,000	0	200	1,50	1,20	0,0	0,000
N7	-520,56	438,13	15,023	15,023	200	200	1,50	1,20	0,0	12,519
N8	-391,04	284,27								
N9	-269,15	139,56	12,679	12,679	200	200	1,50	1,20	0,0	10,566
N10	-383,43	67,96	0,000	0,000	0	200	1,50	1,20	0,0	0,000
N11	-560,18	-49,33	0,000	0,000	0	200	1,50	1,20	0,0	0,000
N12	-692,74	-139,21	12,032	12,032	200	200	1,50	1,20	0,0	10,027
N13	-794,83	-46,29								
N14	-647,03	221,82	0,000	0,000	0	200	1,50	1,20	0,0	0,000
N16	-625,70	256,86	0,000	0,000	0	200	1,50	1,20	0,0	2,000
N17	-790,25	348,25	0,000	0,000	0	200	1,50	1,20	0,0	0,000
N18	-959,39	98,43	0,000	0,000	0	200	1,50	1,20	0,0	0,000

Figura A.5: Planilha com informações sobre as áreas de influência.

Trecho	Nó montante	Nó jusante	Extensão (m)	Vazão (l/s)	DN (mm)	C	Vel. (m/s)	P.Carga (m/km)	P.Carga (m)	H Disp. mon	H Disp. jus (mca)	CotaTer. mon (m)	CotaTer. jus (m)	Cota Piez.	Cota Piez.	Obs.
T1	N1	N2	145,94	51,29	200	150	1,57	9,30	1,357	21,00	18,64	609,00	610,00	630,00	628,64	Rede Projetada
T2	N2	N3	140,58	15,32	150	150	0,80	3,64	0,511	18,64	20,63	610,00	607,50	628,64	628,13	Rede Projetada
T3	N3	N4	131,45	15,32	150	150	0,80	3,64	0,479	20,63	29,61	607,50	598,04	628,13	627,65	Rede Projetada
T4	N4	N5	336,45	7,84	100	150	0,85	6,26	2,114	29,61	52,98	598,04	572,56	627,65	625,54	Rede Projetada
T5	N5	N6	151,20	7,84	100	150	0,85	6,26	0,947	52,98	49,49	572,56	575,10	625,54	624,59	Rede Projetada
T6	N6	N7	203,67	7,84	100	150	0,85	6,26	1,276	49,49	43,76	575,10	579,56	624,59	623,32	Rede Projetada
T7	N7	N8	201,12	5,55	100	150	0,60	3,30	0,664	43,76	43,75	579,56	578,90	623,32	622,65	Rede Projetada
T8	N8	N9	189,20	5,55	100	150	0,60	3,30	0,625	43,75	47,03	578,90	575,00	622,65	622,03	Rede Projetada
T9	N9	N10	134,86	5,02	100	150	0,54	2,75	0,371	47,03	38,07	575,00	583,59	622,03	621,66	Rede Projetada
T10	N10	N11	212,13	5,02	100	150	0,54	2,75	0,583	38,81	32,94	583,59	588,88	622,40	621,82	Rede Projetada
T11	N11	N12	160,16	5,02	100	150	0,54	2,75	0,441	34,10	23,80	588,88	598,74	622,98	622,54	Rede Projetada
T12	N12	N13	138,05	15,05	100	150	1,63	20,97	2,906	24,68	17,68	598,74	608,65	623,42	626,33	Rede Projetada
T14	N13	N14	306,15	4,74	100	150	0,51	2,47	0,757	17,68	29,44	608,65	596,13	626,33	625,57	Rede Projetada
T18	N14	N16	41,02	4,74	100	150	0,51	2,47	0,102	29,44	32,00	596,13	593,47	625,57	625,47	Rede Projetada
T19	N16	N7	209,55	10,23	100	150	1,11	10,25	2,154	32,00	43,76	593,47	579,56	625,47	623,32	Rede Projetada
T20	N16	N17	188,23	7,49	100	150	0,81	5,75	1,083	32,00	28,75	593,47	595,64	625,47	624,39	Rede Projetada
T21	N17	N4	191,28	7,49	100	150	0,81	5,75	1,100	30,91	27,41	595,64	598,04	626,55	625,45	Rede Projetada
T17	N13	N18	219,14	19,79	150	150	1,03	5,84	1,280	17,68	14,05	608,65	611,00	626,33	625,05	Rede Projetada
T22	N18	N2	177,32	19,79	150	150	1,03	5,84	1,036	16,61	16,57	611,00	610,00	627,61	626,57	Rede Projetada

Figura A.6: Resultados obtidos com o programa.

Estes resultados foram obtidos realizando-se cálculos que utilizassem a equação de Hazen-Williams, com os parâmetros definidos como os padrões do programa.

Apêndice B

Nas Figuras B.1, B.2, B.3, B.4, B.5 e B.6 estão demonstrados os resultados obtidos no segundo projeto de redes utilizando o programa CRedes 2001..

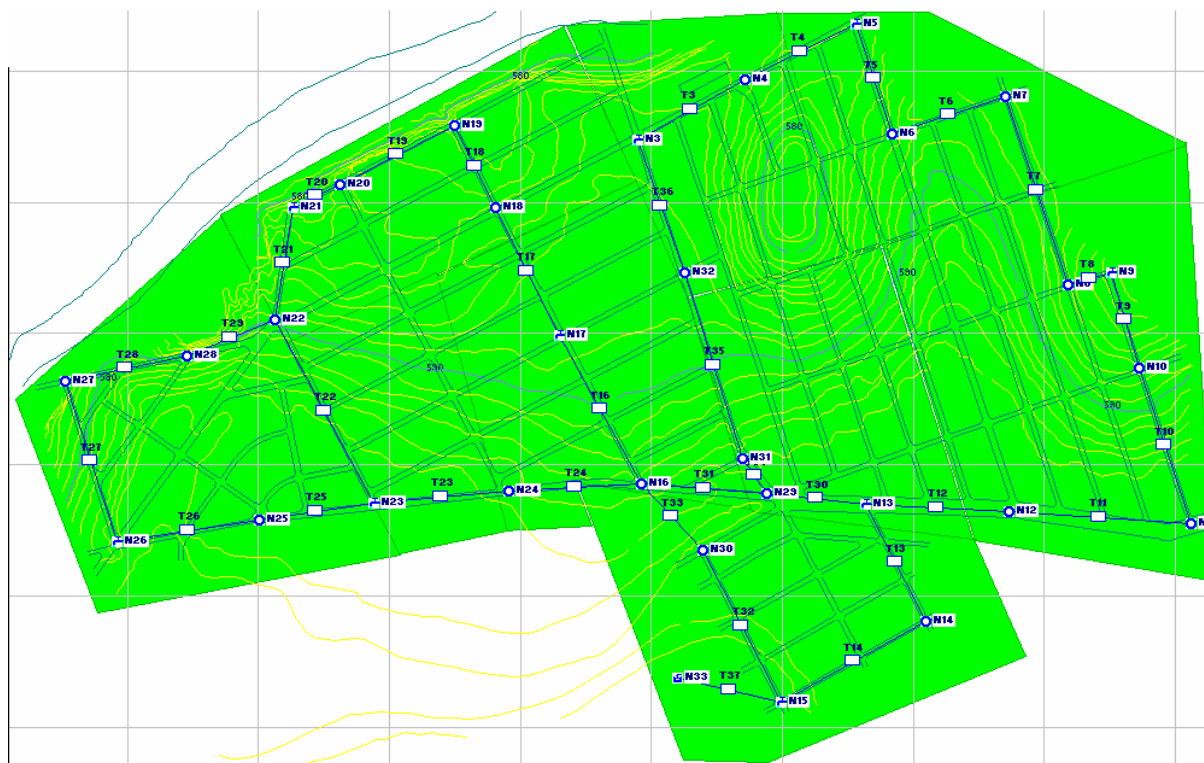


Figura B.1: Planta da região de projeto, apresentando as curvas de nível, arruamento, desenho da rede, vazões, cargas piezométricas e diâmetro das tubulações.

Nó Inicial	Nó Final	Ext.Planta (m)	Nome do Trecho	Ext.Calc. (m)	DN (mm)	Diâm.Ext. (mm)	Espessura (mm)	Situação	Crit.Interp.
N3	N4	187,89	T3	187,91	150	170	6,80	Rede Projetada	Global
N4	N5	189,32	T4	189,32	150	170	6,80	Rede Projetada	Global
N5	N6	176,43	T5	176,43	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N6	N7	182,16	T6	182,16	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N7	N8	302,79	T7	302,79	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N8	N9	68,76	T8	68,84	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N9	N10	151,51	T9	151,55	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N10	N11	250,38	T10	250,38	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N11	N12	278,49	T11	278,49	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N12	N13	219,28	T12	219,28	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N13	N14	200,93	T13	200,93	200	222	8,90	Rede Projetada	Global
N14	N15	252,97	T14	252,97	200	222	8,90	Rede Projetada	Global
N16	N17	258,77	T16	258,81	150	170	6,80	Rede Projetada	Global
N17	N18	218,21	T17	218,23	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N18	N19	139,99	T18	140,02	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N19	N20	196,75	T19	196,75	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N20	N21	79,85	T20	79,85	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N21	N22	173,47	T21	173,61	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N22	N23	317,99	T22	317,99	150	170	6,80	Rede Projetada	Global
N23	N24	206,94	T23	206,94	200	222	8,90	Rede Projetada	Global
N24	N16	202,73	T24	202,74	200	222	8,90	Rede Projetada	Global
N23	N25	176,72	T25	176,72	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N25	N26	219,66	T26	219,66	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N26	N27	257,39	T27	257,62	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N27	N28	189,86	T28	189,93	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N28	N22	145,25	T29	145,26	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N13	N29	151,82	T30	151,82	100	118	4,80	Rede Projetada	Global
N29	N16	191,96	T31	191,96	200	222	8,90	Rede Projetada	Global
N15	N30	261,05	T32	261,05	300	326	13,10	Rede Projetada	Global
N30	N16	138,08	T33	138,11	300	326	13,10	Rede Projetada	Global
N29	N31	64,85	T34	64,85	200	222	8,90	Rede Projetada	Global
N31	N32	297,03	T35	297,09	200	222	8,90	Rede Projetada	Global
N32	N3	214,91	T36	214,91	200	222	8,90	Rede Projetada	Global
N15	N33	162,50	T37	162,50	300	326	13,10	Rede Projetada	Global

Figura B.2: Descrição e especificações dos elementos de tubos da rede.

Nó	Coord. N (m)	Coord. E (m)	Cota Terr. (m)	Cota Nó (m)	k Local	P min. (mca)	P max. (mca)	Situação	Contorno	Valor	Grandeza
N3	1096,04	1178,97	587,420	585,922	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	9,736	Vazão(l/s)
N4	1188,11	1342,76	585,009	583,509	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N5	1272,82	1512,07	593,000	591,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	10,874	Vazão(l/s)
N6	1105,25	1567,28	586,786	585,286	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N7	1162,33	1740,27	587,109	585,609	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N8	875,06	1835,96	586,189	584,689	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N9	893,47	1902,21	582,970	581,472	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	19,797	Vazão(l/s)
N10	747,99	1944,54	586,445	584,945	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N11	510,44	2023,67	598,000	596,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N12	528,85	1745,79	600,000	598,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N13	539,90	1526,79	597,000	595,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	10,310	Vazão(l/s)
N14	361,28	1618,81	597,000	595,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N15	237,90	1397,97	592,000	590,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	15,457	Vazão(l/s)
N16	571,21	1184,49	593,441	591,941	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N17	797,71	1059,35	588,720	587,219	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	13,707	Vazão(l/s)
N18	992,91	961,81	586,058	584,558	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N19	1118,14	899,24	583,333	581,833	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N20	1027,90	724,41	583,327	581,827	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N21	992,91	652,64	582,430	580,929	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	11,917	Vazão(l/s)
N22	821,65	625,04	589,364	587,864	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N23	541,74	775,94	596,000	594,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	6,648	Vazão(l/s)
N24	560,16	982,06	594,696	593,196	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N25	515,96	601,11	595,000	593,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N26	482,82	383,96	596,000	594,500	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Vazão Pontual	16,656	Vazão(l/s)
N27	727,74	304,82	585,019	583,519	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N28	766,41	490,70	590,300	588,800	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N29	556,48	1375,88	596,000	594,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N30	469,93	1278,35	596,000	594,500	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N31	609,88	1339,08	594,462	592,962	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N32	893,47	1250,74	588,458	586,958	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada			
N33	274,73	1239,70	592,000	590,000	0,000	15,00	60,00	Rede Projetada	Reservatório	622,000	NA(m)

Figura B.3: Descrição e especificações dos elementos de nós da rede.

Todos os resultados foram obtidos realizando-se cálculos que utilizassem a equação de Hazen-Williams, com os parâmetros definidos como os padrões do programa.

Nó Inicial	Nó Final	Extensão (m)	Nome do Trecho	Material	Tipo de Superfície	Tipo de Escoramento
N3	N4	187,91	T3	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N4	N5	189,32	T4	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Descontínuo
N5	N6	176,43	T5	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Descontínuo
N6	N7	182,16	T6	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N7	N8	302,79	T7	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N8	N9	68,84	T8	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N9	N10	151,55	T9	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N10	N11	250,38	T10	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Descontínuo
N11	N12	278,49	T11	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Descontínuo
N12	N13	219,28	T12	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Descontínuo
N13	N14	200,93	T13	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Descontínuo
N14	N15	252,97	T14	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Descontínuo
N16	N17	258,81	T16	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N17	N18	218,23	T17	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N18	N19	140,02	T18	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N19	N20	196,75	T19	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N20	N21	79,85	T20	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N21	N22	173,61	T21	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N22	N23	317,99	T22	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Descontínuo
N23	N24	206,94	T23	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Descontínuo
N24	N16	202,74	T24	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N23	N25	176,72	T25	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Descontínuo
N25	N26	219,66	T26	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Descontínuo
N26	N27	257,62	T27	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N27	N28	189,93	T28	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N28	N22	145,26	T29	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N13	N29	151,82	T30	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Descontínuo
N29	N16	191,96	T31	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Descontínuo
N15	N30	261,05	T32	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Descontínuo
N30	N16	138,11	T33	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N29	N31	64,85	T34	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Descontínuo
N31	N32	297,09	T35	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N32	N3	214,91	T36	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Pontalete
N15	N33	162,50	T37	PVC Tigre Vinilfer DEFoFo	Sem revestimento	Descontínuo

Figura B.4: Planilha de quantitativos.

Nó	Coord. N (m)	Coord. E (m)	Área (ha)	Área Planta (ha)	Tx.Pop. (hab/ha)	Consumo (l/hab/dia)	k1	k2	Perdas (%)	Vazão (l/s)
N3	1096,04	1178,97	11,683	11,683	200	200	1,50	1,20	0,0	9,736
N4	1188,11	1342,76								
N5	1272,82	1512,07	13,049	13,049	200	200	1,50	1,20	0,0	10,874
N6	1105,25	1567,28								
N7	1162,33	1740,27								
N8	875,06	1835,96								
N9	893,47	1902,21	23,756	23,756	200	200	1,50	1,20	0,0	19,797
N10	747,99	1944,54								
N11	510,44	2023,67								
N12	528,85	1745,79								
N13	539,90	1526,79	12,372	12,372	200	200	1,50	1,20	0,0	10,310
N14	361,28	1618,81								
N15	237,90	1397,97	18,548	18,548	200	200	1,50	1,20	0,0	15,457
N16	571,21	1184,49								
N17	797,71	1059,35	16,449	16,449	200	200	1,50	1,20	0,0	13,707
N18	992,91	961,81								
N19	1118,14	899,24								
N20	1027,90	724,41								
N21	992,91	652,64	14,300	14,300	200	200	1,50	1,20	0,0	11,917
N22	821,65	625,04								
N23	541,74	775,94	7,977	7,977	200	200	1,50	1,20	0,0	6,648
N24	560,16	982,06								
N25	515,96	601,11								
N26	482,82	383,96	19,987	19,987	200	200	1,50	1,20	0,0	16,656
N27	727,74	304,82								
N28	766,41	490,70								
N29	556,48	1375,88								
N30	469,93	1278,35								
N31	609,88	1339,08								
N32	893,47	1250,74								
N33	274,73	1239,70								

Figura B.5: Planilha com informações sobre as áreas de influência.

Trecho	Nó montante	Nó jusante	Extensão (m)	Vazão (l/s)	DN (mm)	C	Vel. (m/s)	P.Carga (m/km)	P.Carga (m)	H Disp. mon	H Disp. jus (mca)	CotaTer. mon (m)	CotaTer. jus (m)	Cota Piez.	Cota Piez.	Obs.
T3	N3	N4	187,89	19,80	150	150	1,03	5,84	1,098	30,03	31,34	587,42	585,01	617,45	616,35	Rede Projetada
T4	N4	N5	189,32	19,80	150	150	1,03	5,84	1,107	31,34	22,25	585,01	593,00	616,35	615,25	Rede Projetada
T5	N5	N6	176,43	8,92	100	150	0,97	7,97	1,405	22,25	27,05	593,00	586,79	615,25	613,84	Rede Projetada
T6	N6	N7	182,16	8,92	100	150	0,97	7,97	1,451	27,05	25,28	586,79	587,11	613,84	612,39	Rede Projetada
T7	N7	N8	302,79	8,92	100	150	0,97	7,97	2,412	25,28	23,79	587,11	586,19	612,39	609,98	Rede Projetada
T8	N8	N9	68,76	8,92	100	150	0,97	7,97	0,548	23,79	26,46	586,19	582,97	609,98	609,43	Rede Projetada
T9	N9	N10	151,51	10,87	100	150	1,18	11,49	1,741	26,46	24,72	582,97	586,44	609,43	611,17	Rede Projetada
T10	N10	N11	250,38	10,87	100	150	1,18	11,49	2,876	24,72	16,04	586,44	598,00	611,17	614,04	Rede Projetada
T11	N11	N12	278,49	10,87	100	150	1,18	11,49	3,199	16,04	17,24	598,00	600,00	614,04	617,24	Rede Projetada
T12	N12	N13	219,28	10,87	100	150	1,18	11,49	2,519	17,24	17,73	600,00	597,00	617,24	614,73	Rede Projetada
T13	N13	N14	200,93	25,98	200	150	0,79	2,64	0,530	22,76	23,29	597,00	597,00	619,76	620,29	Rede Projetada
T14	N14	N15	252,97	25,98	200	150	0,79	2,64	0,667	23,29	27,63	597,00	592,00	620,29	619,63	Rede Projetada
T16	N16	N17	258,77	18,82	150	150	0,98	5,32	1,378	26,40	29,74	593,44	588,72	619,84	618,46	Rede Projetada
T17	N17	N18	218,21	5,12	100	150	0,55	2,84	0,621	29,74	31,79	588,72	586,06	618,46	617,84	Rede Projetada
T18	N18	N19	139,99	5,12	100	150	0,55	2,84	0,398	31,79	34,11	586,06	583,33	617,84	617,44	Rede Projetada
T19	N19	N20	196,75	5,12	100	150	0,55	2,84	0,560	34,11	33,56	583,33	583,33	617,44	616,89	Rede Projetada
T20	N20	N21	79,85	5,12	100	150	0,55	2,84	0,227	33,56	34,23	583,33	582,43	616,89	616,66	Rede Projetada
T21	N21	N22	173,47	6,80	100	150	0,74	4,81	0,836	34,23	28,13	582,43	589,36	616,66	617,49	Rede Projetada
T22	N22	N23	317,99	13,61	150	150	0,71	2,92	0,928	28,13	20,57	589,36	596,00	617,49	616,57	Rede Projetada
T23	N23	N24	206,94	30,10	200	150	0,92	3,47	0,717	22,42	24,44	596,00	594,70	618,42	619,14	Rede Projetada
T24	N24	N16	202,73	30,10	200	150	0,92	3,47	0,703	24,44	26,40	594,70	593,44	619,14	619,84	Rede Projetada
T25	N23	N25	176,72	9,85	100	150	1,07	9,56	1,690	22,42	21,73	596,00	595,00	618,42	616,73	Rede Projetada
T26	N25	N26	219,66	9,85	100	150	1,07	9,56	2,100	21,73	18,63	595,00	596,00	616,73	614,63	Rede Projetada
T27	N26	N27	257,39	6,81	100	150	0,74	4,83	1,244	18,63	30,86	596,00	585,02	614,63	615,88	Rede Projetada
T28	N27	N28	189,86	6,81	100	150	0,74	4,83	0,917	30,86	26,49	585,02	590,30	615,88	616,79	Rede Projetada
T29	N28	N22	145,25	6,81	100	150	0,74	4,83	0,701	26,49	28,13	590,30	589,36	616,79	617,49	Rede Projetada
T30	N13	N29	151,82	4,80	100	150	0,52	2,52	0,383	22,76	23,38	597,00	596,00	619,76	619,38	Rede Projetada
T31	N29	N16	191,96	24,74	200	150	0,76	2,41	0,462	23,38	26,40	596,00	593,44	619,38	619,84	Rede Projetada
T32	N15	N30	261,05	73,67	300	150	1,04	2,80	0,731	28,96	24,23	592,00	596,00	620,96	620,23	Rede Projetada
T33	N30	N16	138,08	73,67	300	150	1,04	2,80	0,387	24,23	26,40	596,00	593,44	620,23	619,84	Rede Projetada
T34	N29	N31	64,85	29,53	200	150	0,90	3,34	0,217	23,38	24,70	596,00	594,46	619,38	619,16	Rede Projetada
T35	N31	N32	297,03	29,53	200	150	0,90	3,35	0,994	24,70	29,71	594,46	588,46	619,16	618,17	Rede Projetada
T36	N32	N3	214,91	29,53	200	150	0,90	3,34	0,719	29,71	30,03	588,46	587,42	618,17	617,45	Rede Projetada
T37	N15	N33	162,50	115,10	300	150	1,63	6,40	1,040	31,04	30,00	592,00	592,00	623,04	622,00	Rede Projetada

Figura B.6: Resultados obtidos com o programa.

Apêndice C: Guia de uso do software CRedes 2001.

C.1 Dados de entrada:

O primeiro passo a ser tomado para a realização de um projeto usando o CRedes é a entrada com os dados topográficos da rede. Primeiramente acessa-se Arquivos/Lê DFX de topografia e escolhe-se os layers relativos aos elementos topográficos, conforme mostra a Figura C.1.



Figura C.1: Seleção dos elementos topográficos da rede.

Os mesmos passos são seguidos para dar entrada com o arruamento e com pontos cotados presentes na planta, bastando acessar Arquivos/Lê DFX de ruas e Arquivos/Lê DFX de pontos cotados.

Após dar entrada no programa com todos os dados necessários, deve-se dar início ao desenho da rede propriamente dita.

C.2 Desenho da rede:

O desenho da rede é executado posicionando-se os nós e os tubos de forma que a rede atenda a toda a área especificada e que os nós situem-se em pontos representativos dos pontos de consumo, localização de válvulas, etc.

O posicionamento do primeiro nó deve ser feito com um clique com o botão direito do mouse e os demais com um clique com o botão esquerdo (Figura C.2). Quando for necessário continuar a rede de um nó previamente desenhado, deve-se selecionar “Shift + Clique com botão esquerdo do mouse”.



Figura C.2: Início da composição do desenho de uma rede.

Após o término do posicionamento dos nós, alguns destes podem estar marcados com um "X" vermelho. Isto ocorre quando um nó é posicionado fora da área de abrangência das curvas de níveis. Para estes nós é necessário entrar com os valores das cotas do terreno e da cota da tubulação. Para isto deve-se clicar no nó com o botão direito do mouse e modificar as cotas nos respectivos campos de entrada (Figura C.3).

Definição do nó: N2

Dados do Nó | Resultados

Dados para Projeto

Nome: **N2**

Pressão Mínima (mca): **15**

Pressão Máxima (mca): **60**

Cota do Nó: **608**

Cond. de Contorno:

Situação: **Rede Projetada**

Situação

T27

Dados Topográficos

UTM { Norte (m): **-1095,84**
Este (m): **211,97**

Cota do Terreno (m): **610**

Calcula (C. Nível)

OK **Cancela**

Figura C.3: Tela de informações a respeito dos nós.

C.3 Condições de contorno:

Em cada nó deve ser especificada a condição de contorno desejada (Figuras C.4 e C.5) dentre as possíveis: reservatório, vazão pontual, válvula de controle, válvula de redução de pressão e booster em linha. Para cada condição de contorno devem ser especificados dados relativos ao seu emprego, tais como cotas, curvas características, etc. O programa já traz configurações padrões para estas especificações, mas podem ser alteradas em qualquer momento, a critério do projetista.

Definição do nó: N1

Dados do Nó | Resultados

Dados para Projeto

Nome: **N1**

Pressão Mínima (mca): **15**

Pressão Máxima (mca): **60**

Coeficiente de Perda Localizada: **0**

Cota do Nó: **606**

Cond. de Contorno: **Reservatório**

Valor da Cota do NA (m): **631**

Situação: **Rede Projetada**

Situação

Dados Topográficos

UTM { Norte (m): **-1052,93**
Este (m): **21,66**

Cota do Terreno (m): **608,00**

Calcula (C. Nível)

OK **Cancela**

Figura C.4: Seleção do nó a ser usado como reservatório.

Selecionando a condição de contorno Vazão pontual, é necessário estabelecer a área de influência do nó, da seguinte maneira: seleciona-se o botão Traçar Área (Figura C.6); ligam-se os vértices da área de influência; ao fim da operação aperta-se “Enter” e será visualizada uma tela semelhante à Figura C.7, com informações da área de influência e da vazão do ponto de consumo.

Deve-se repetir o procedimento acima para todos os pontos de consumo de forma que a soma de todas as áreas de influência dê cobertura a toda a área de estudo.

Definição do nó: N5

Dados do Nó		Resultados
Dados para Projeto		
Nome:	N5	
Pressão Mínima (mca):	15	
Pressão Máxima (mca):	60	
Coeficiente de Perda Localizada:	0	
Cota do Nó:	608,7353	
Cond. de Contorno:	Booster em Linha Válvula de Controle Válvula Redutora de Pressão Vazão Pontual	
Situação:	Rede Projetada	
Situação		
		
Dados Topográficos		
UTM {	Norte (m): -878,18 Este (m): 196,37	
Cota do Terreno (m):	610,24	
Calcula (C. Nível)		
OK Cancela		

Figura C.5: Condições de Contorno possíveis.

Definição do nó: N3

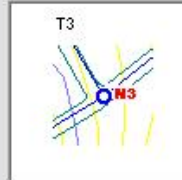
Dados do Nó		Resultados
Dados para Projeto		
Nome:	N3	
Pressão Mínima (mca):	15	
Pressão Máxima (mca):	60	
Coeficiente de Perda Localizada:	0	
Cota do Nó:	596,5497	
Cond. de Contorno:	Vazão Pontual	
Área de influência (ha):	0,000   	
Valor da Vazão (l/s):	0,000	Traçar Área
Situação:	Rede Projetada	
Situação		
		
Dados Topográficos		
UTM {	Norte (m): -955,41 Este (m): 444,39	
Cota do Terreno (m):	598,05	
Calcula (C. Nível)		
OK Cancela		

Figura C.6: Configuração de nó de pontos de consumo.

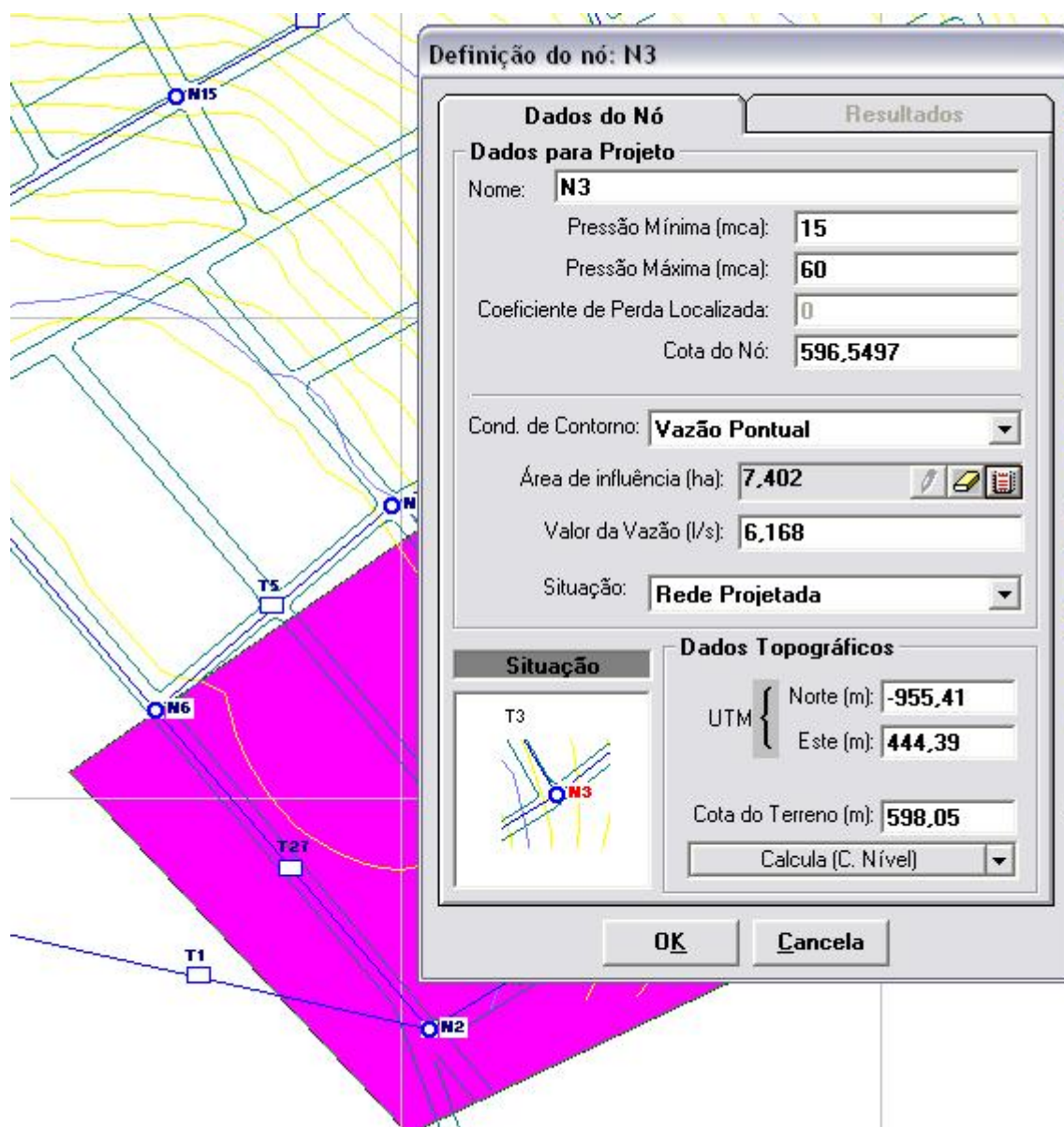


Figura C.7: Área de influência.

C.4 Cálculos:

Após o término da fase de desenho da rede faz-se necessário o cálculo do dimensionamento propriamente dito. O próximo passo pode ser feito de duas formas diferentes: a primeira é o usuário estimar o diâmetro de cada tubo e calcular a vazão pelo programa; a segunda é fazer o programa dimensionar os diâmetros inicialmente e, posteriormente, dimensionar as vazões. A segunda opção é a mais prática e rápida, não necessitando de muita experiência do operador para determinar um bom diâmetro para cada tubo, sem saber as vazões que passam em cada um deles.

A tela de cálculos é da forma da mostrada na Figura C.8. É possível escolher entre a Fórmula Universal e a Fórmula de Hazen-Williams para se calcular as vazões. Selecionando “Inicia” o programa fará todo o dimensionamento, respeitando as condições de truncamento que podem ser alteradas selecionando “Dados Gerais”. Com o término dos cálculos, a rede será dimensionada e terá uma forma como a exposta na Figura C.9.

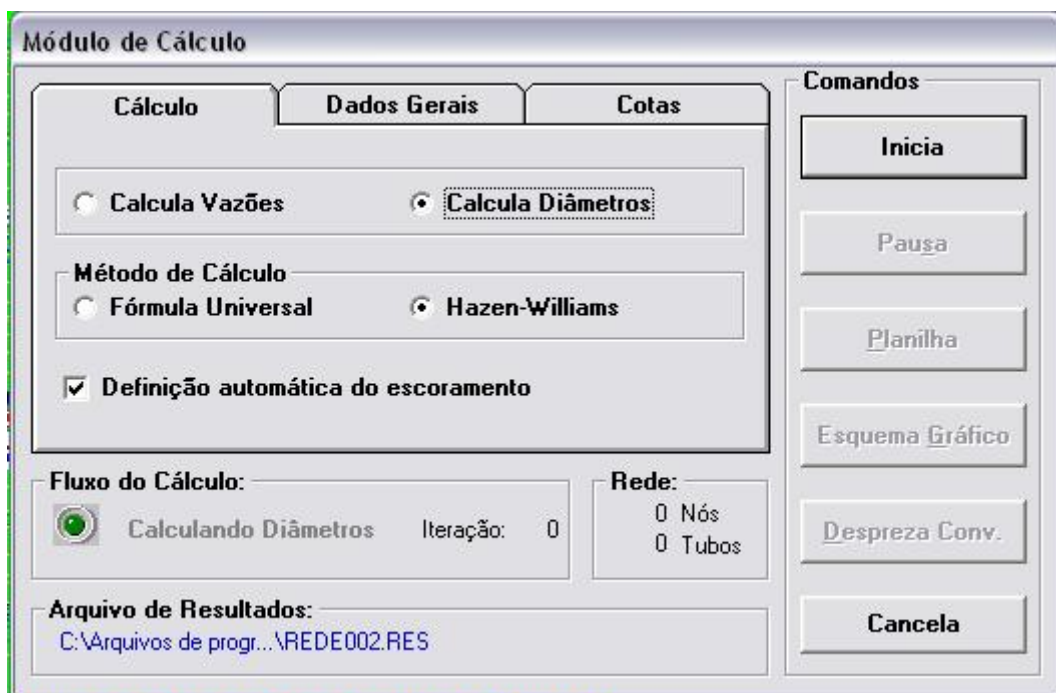


Figura C.8: Janela de cálculo.

C.5 Visualização dos resultados:

Após a primeira iteração, nota-se que vários tubos e nós podem estar assinalados de vermelho. Isto quer dizer que o dimensionamento realizado pecou em algumas das condições que o projeto precisa obedecer, como pressão máxima ou mínima, perda de carga, etc. Ocorrendo esta situação, deve-se observar as tabelas de resultados (Figura C.10): onde apresentar indicação em vermelho deve-se fazer alguma alteração no projeto. Estas alterações podem ser mudança no diâmetro dos tubos (Figura C.11), alteração das condições de contorno (Figura C.12), mudança no desenho da rede, etc.

Figura C.9: Configuração da rede após a primeira iteração.

Trecho	Nó montante	Nó jusante	Extensão (m)	Vazão (l/s)	DN (mm)	C	Vel. (m/s)	P.Carga (m/km)	P.Carga (m)	H Disp. mon	H Disp. jus (mca)	CotaTer. mon (m)	CotaTer. jus (m)	Cota Piez.	Cota Piez.	Obs.
T1	N1	N2	195,09	41,73	250	150	0,84	2,28	0,444	23,00	20,56	608,00	610,00	631,00	630,56	Rede Projetada
T2	N2	N3	271,55	17,10	200	150	0,52	1,22	0,330	20,56	32,18	610,00	598,05	630,56	630,23	Rede Projetada
T3	N3	N4	190,64	4,92	100	150	0,53	2,65	0,505	32,18	34,00	598,05	595,72	630,23	629,72	Rede Projetada
T4	N5	N4	173,66	3,45	100	150	0,37	1,37	0,239	19,72	34,00	610,24	595,72	629,96	629,72	Rede Projetada
T5	N6	N5	129,96	3,45	100	150	0,37	1,37	0,178	19,14	19,72	611,00	610,24	630,14	629,96	Rede Projetada
T6	N6	N7	218,64	14,66	150	150	0,76	3,35	0,732	19,14	20,73	611,00	608,68	630,14	629,41	Rede Projetada
T7	N7	N8	138,53	12,17	150	150	0,63	2,37	0,330	20,73	30,25	608,68	598,83	629,41	629,08	Rede Projetada
T8	N8	N9	372,79	3,73	150	150	0,19	0,27	0,099	30,25	45,39	598,83	583,59	629,08	628,98	Rede Projetada
T9	N9	N10	136,53	6,08	150	150	0,32	0,66	0,090	45,39	53,89	583,59	575,00	628,98	628,89	Rede Projetada
T10	N11	N10	246,99	2,50	100	150	0,27	0,76	0,187	48,84	53,89	580,23	575,00	629,07	628,89	Rede Projetada
T11	N12	N11	141,63	2,50	100	150	0,27	0,76	0,107	49,83	48,84	579,35	580,23	629,18	629,07	Rede Projetada
T13	N13	N14	126,47	2,35	100	150	0,25	0,67	0,085	32,97	37,96	596,21	591,13	629,18	629,10	Rede Projetada
T14	N14	N9	175,82	2,35	100	150	0,25	0,67	0,118	37,96	45,39	591,13	583,59	629,10	628,98	Rede Projetada
T15	N15	N13	127,81	2,49	100	150	0,27	0,75	0,096	24,75	32,97	604,53	596,21	629,28	629,18	Rede Projetada
T16	N7	N15	173,77	2,49	100	150	0,27	0,75	0,130	20,73	24,75	608,68	604,53	629,41	629,28	Rede Projetada
T17	N13	N16	41,15	0,14	100	150	0,01	0,00	0,000	32,97	35,61	596,21	593,57	629,18	629,18	Rede Projetada
T18	N12	N16	214,49	0,12	100	150	0,01	0,00	0,001	49,83	35,61	579,35	593,57	629,18	629,18	Rede Projetada
T19	N17	N12	202,35	2,63	100	150	0,28	0,83	0,167	54,27	49,83	575,08	579,35	629,35	629,18	Rede Projetada
T20	N18	N17	148,16	1,93	100	150	0,21	0,47	0,069	56,76	54,27	572,66	575,08	629,42	629,35	Rede Projetada
T21	N19	N18	145,11	1,93	100	150	0,21	0,47	0,068	47,56	56,76	581,92	572,66	629,48	629,42	Rede Projetada
T22	N3	N19	192,60	6,01	100	150	0,65	3,83	0,741	32,18	47,56	598,05	581,92	630,23	629,48	Rede Projetada
T23	N20	N17	93,77	3,53	100	150	0,38	1,43	0,134	48,94	54,27	580,54	575,08	629,48	629,35	Rede Projetada
T24	N19	N20	158,21	0,30	100	150	0,03	0,01	0,002	47,56	48,94	581,92	580,54	629,48	629,48	Rede Projetada
T25	N4	N20	195,16	3,24	100	150	0,35	1,22	0,238	34,00	48,94	595,72	580,54	629,72	629,48	Rede Projetada
T26	N4	N16	188,59	5,14	100	150	0,56	2,87	0,541	34,00	35,61	595,72	593,57	629,72	629,18	Rede Projetada
T27	N2	N6	174,81	24,63	200	150	0,75	2,39	0,418	20,56	19,14	610,00	611,00	630,56	630,14	Rede Projetada

Figura C.10: Resultados da Primeira iteração.

Definição do trecho: T6

Dimensionamento	Quantitativos	Resultados
Dados do Trecho:		
Nome do Trecho:	T6	Nó Inicial: N6 Nó Final: N7
Extensão em Planta (m):	218,64	
Comprimento de Cálculo (m):	218,64	
Diâmetro Nominal (mm):	150	
Diâmetro Externo (mm):	0	
Espessura (mm):	100	
Situação:	150	
	200	
	250	
Critério de Interpolação de Cotas:	300	
	Interp.	

OK Cancela

Figura C.11: Alteração no diâmetro dos tubos.

Definição do nó: N18

Dados do Nó	Resultados
Dados para Projeto	
Nome:	N18
Pressão Mínima (mca):	15
Pressão Máxima (mca):	60
Coeficiente de Perda Localizada:	0
Cota do Nó:	571,1585
Cond. de Contorno:	Booster em Linha Válvula de Controle Válvula Redutora de Pressão Vazão Pontual
Situação:	Rede Projetada
Dados Topográficos	
Situação 	UTM { Norte (m): -746,33 Este (m): 709,58
	Cota do Terreno (m): 572,66 Calcula (C. Nível)

OK Cancela

Figura C.12: Alteração da condição de contorno.

Apêndice D: Projeto de rede usando o método de Hardy-Cross.

Para se verificar a eficiência do programa CRedes 2001 realizou-se o projeto de uma rede, apresentada na Figura D.1, pelo método de Hardy-Cross e comparado com os resultados obtidos pela resolução da rede pelo software. Foi utilizada a equação de Hazen-Williams como equação de escoamento.

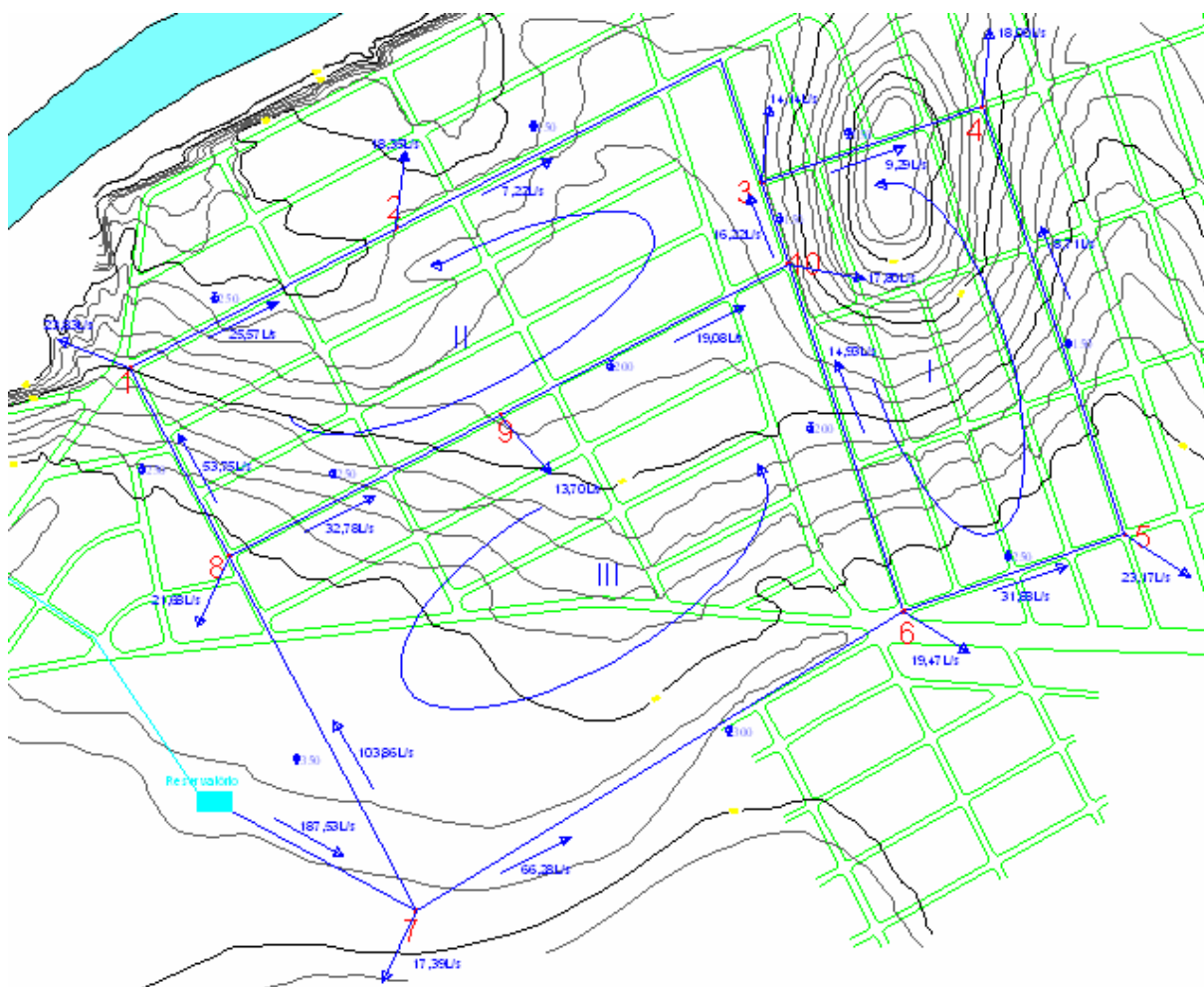


Figura D.1: Configuração da rede.

D.1 Cálculos através do Método de Hardy-Cross

Primeiramente, determinou-se a área de influência de cada nó. A escolha das áreas é feita, de certo modo, intuitivamente. Com as áreas determinadas, verificou-se a população correspondente a cada nó.

Nó	Área na Zona A (m²)	População da Zona A	Área na Zona B (m²)	População da Zona B	Área na Zona C (m²)	População da Zona C	População Total
1	24354,69	682	191574,76	4598	-	-	5280
2	54636,97	1530	105676,63	2536	-	-	4066
3	55886,34	1565	65333,46	1568	-	-	3133
4	7719,36	216	157154,62	3772	-	-	3988
5	-	-	213866,34	5133	-	-	5133
6	-	-	124946,39	2999	65726,54	1315	4313
7	-	-	29928,11	718	156750,25	3135	3853
8	37501,89	1050	156376,24	3753	-	-	4803
9	43062,26	1206	57252,82	1374	22726,86	455	3034
10	128761,04	3605	14048,04	337	-	-	3942

Tabela D.1: Cálculo da população por nó.

Com os dados da população pela qual cada nó é “responsável”, pode-se calcular a vazão no nó com a fórmula $Q = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot P \cdot q}{86400}$, onde $q = 200\text{L/hab.dia}$, $C=150$, $K_1=1,3$ e $K_2=1,5$.

Nó	População Total	Vazão no Nó (L/s)
1	5280	25,53
2	4066	19,66
3	3133	15,15
4	3988	19,29
5	5133	24,83
6	4313	20,86
7	3853	18,63
8	4803	23,23
9	3034	14,68
10	3942	19,06

Tabela D.2: Cálculo da vazão por nó.

Partindo do nó 4 (nó mais a jusante), fizemos a estimativa das vazões em cada trecho, conforme ilustra a Figura D.2. Esta figura indica também o diâmetro escolhido em cada trecho (estes diâmetros também estão na Tabela D.3). Este diâmetro obedece ao critério da perda de carga máxima ($J_{\text{máx}} = 8\text{m/km}$).

Anel	Trecho	L(m)	D(mm)	$Q_1(\text{L/s})$	$J(\text{m}/100\text{m})$	$h_{p1}(\text{m})$	h_{p1}/Q
I	3 a 4	239,69	150	-9,00	0,1925	-0,46	0,05
	4 a 5	463,12	150	9,00	0,1925	0,89	0,10
	5 a 6	239,78	250	32,17	0,1689	0,40	0,01
	3 a 10	90,44	150	-11,57	0,3064	-0,28	0,02
	6 a 10	375,58	200	-14,68	0,1173	-0,44	0,03
	Somatórios:					0,12	0,22
II	1 a 8	218,14	250	-53,75	0,4365	-0,95	0,02
	8 a 9	313,61	250	28,39	0,1340	0,42	0,01
	9 a 10	333,33	200	14,69	0,1174	0,39	0,03
	3 a 10	90,44	150	11,57	0,3064	0,28	0,02
	1 a 2	308,00	250	-29,92	0,1477	-0,45	0,02
	2 a 3	508,76	150	-11,57	0,3064	-1,56	0,13
	Somatórios:					-1,88	0,23
III	7 a 8	411,15	350	-103,82	0,2866	-1,18	0,01
	8 a 9	313,61	250	-28,39	0,1340	-0,42	0,01
	9 a 10	333,33	200	-14,69	0,1174	-0,39	0,03
	6 a 7	587,61	300	66,32	0,2650	1,56	0,02
	6 a 10	375,58	200	14,68	0,1173	0,44	0,03
	Somatórios:					0,01	0,11

Tabela D.3: Cálculo da perda de carga por anel.

Com os dados da *Tabela 3* pode-se calcular os valores de ΔQ_1 , ΔQ_2 e ΔQ_3 , isto é, os acréscimos de vazão em cada anel. As vazões estimadas não estão adequadas, visto que $|\Sigma h_p| = 1,88\text{m} > 0,5\text{m}$. Assim, utiliza-se o processo iterativo até que esta condição ($|\Sigma h_p| <$

$0,5\text{m}$) seja satisfeita em todos os anéis. Com a fórmula $\Delta Q = \frac{-\sum h_p}{1,85 \cdot \sum \frac{h_p}{Q}}$, obtém-se:

$\Delta Q_1 = -0,29/s$, $\Delta Q_2 = 4,35 \text{ L/s}$ e $\Delta Q_3 = -0,04 \text{ L/s}$.

Assim, temos as novas vazões Q_2 .

Anel	Trecho	L(m)	D(mm)	$Q_2(\text{L/s})$	$h_{p2}(\text{m})$	h_{p2}/Q
I	3 a 4	239,69	150	-9,29	-0,49	0,05
	4 a 5	463,12	150	8,71	0,84	0,10
	5 a 6	239,78	250	31,88	0,40	0,01
	3 a 10	90,44	150	-16,22	-0,52	0,03
	6 a 10	375,58	200	-14,93	-0,45	0,03
	Somatórios:				-0,22	0,22
II	1 a 8	218,14	250	-49,40	-0,81	0,02
	8 a 9	313,61	250	32,78	0,55	0,02
	9 a 10	333,33	200	19,08	0,63	0,03
	3 a 10	90,44	150	16,22	0,52	0,03
	1 a 2	308,00	250	-25,57	-0,34	0,01
	2 a 3	508,76	150	-7,22	-0,65	0,09
	Somatórios:				-0,10	0,20
III	7 a 8	411,15	350	-103,86	-1,18	0,01
	8 a 9	313,61	250	-32,78	-0,55	0,02
	9 a 10	333,33	200	-19,08	-0,63	0,03
	6 a 7	587,61	300	66,28	1,56	0,02
	6 a 10	375,58	200	14,93	0,45	0,03
	Somatórios:				-0,35	0,12

Tabela D.4: Cálculo da vazão em cada trecho e da perda de carga por anel.

Estas vazões já obedecem ao critério de parada das iterações, podendo ser considerados os valores finais.

D.2 Resultados do programa

Executou-se o programa CRedes tomando-se como dados de entrada os valores dos diâmetros dos trechos dos tubos obtidos nos resultados e as vazões em cada nó obtidas em D.1. Os resultados obtidos neste segundo projeto diferenciaram um pouco do anterior devido ao fato de que alguns diâmetros não puderam ser reproduzidos devido a limitações já citadas

do CRedes. Entretanto, pode-se afirmar que o programa tem uma boa eficiência, como pode ser notado nas Figuras D.2 e D.3.

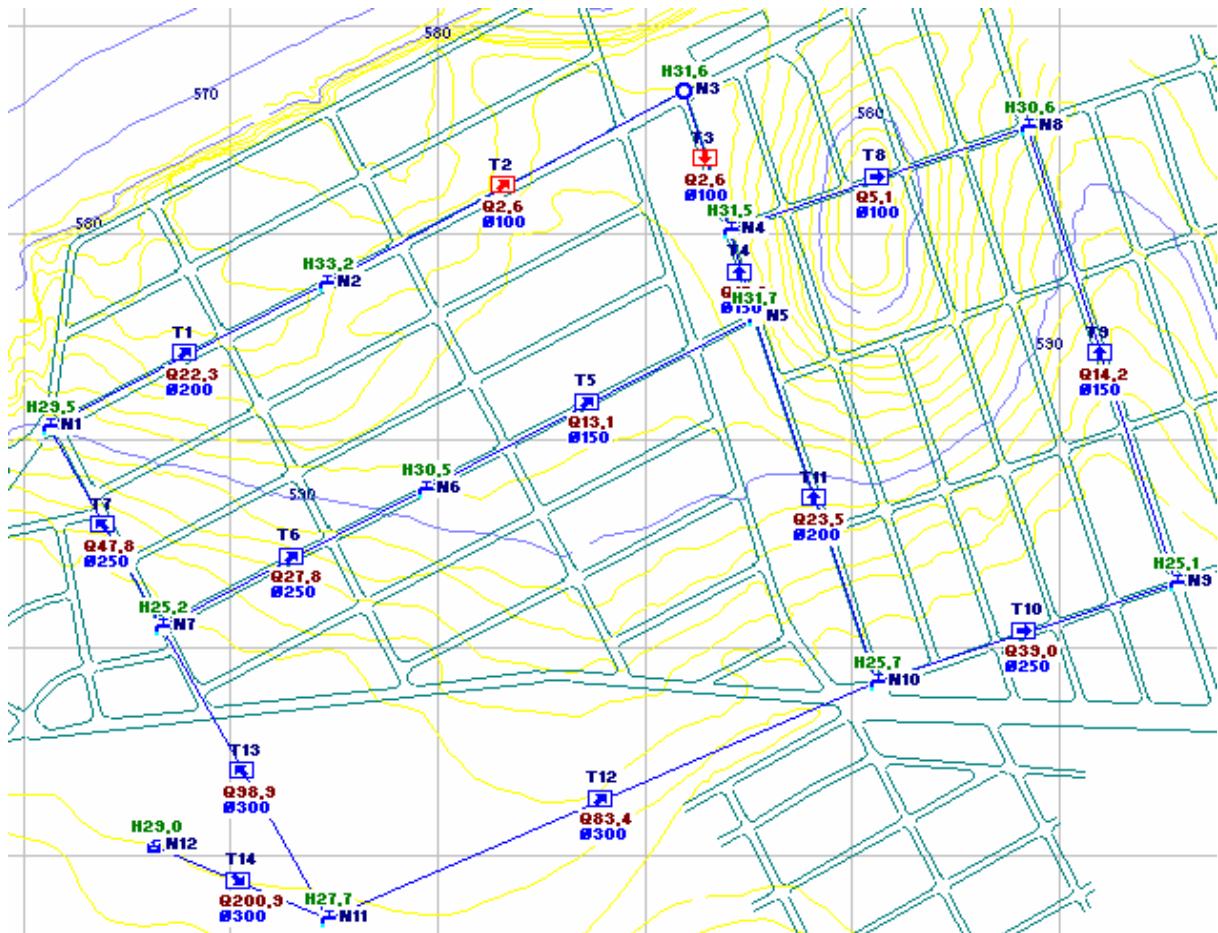


Figura D.2: Configuração da rede com cálculos realizados pelo programa CRedes.

Trecho	Nó montante	Nó jusante	Extensão (m)	Vazão (l/s)	DN (mm)	C	Vel. (m/s)	P.Carga (m/km)	P.Carga (m)	H Disp. mon	H Disp. jus (mca)	CotaTer. mon (m)	CotaTer. jus (m)	Cota Piez.	Cota Piez.	Obs.
T1	N1	N2	300,46	22,31	200	150	0,68	1,99	0,598	29,53	33,24	590,00	585,89	619,53	618,93	Rede Projetada
T2	N2	N3	392,80	2,65	100	150	0,29	0,84	0,330	33,24	31,60	585,89	587,00	618,93	618,60	Rede Projetada
T3	N3	N4	141,50	2,65	100	150	0,29	0,84	0,119	31,60	31,47	587,00	587,01	618,60	618,48	Rede Projetada
T4	N5	N4	88,02	17,58	150	150	0,91	4,89	0,413	31,66	31,47	587,23	587,01	618,89	618,48	Rede Projetada
T5	N6	N5	358,92	13,11	150	150	0,68	2,72	0,978	30,47	31,66	589,40	587,23	619,87	618,89	Rede Projetada
T6	N7	N6	286,49	27,79	250	150	0,56	1,07	0,307	25,18	30,47	595,00	589,40	620,18	619,87	Rede Projetada
T7	N7	N1	221,76	47,84	250	150	0,96	2,93	0,651	25,18	29,53	595,00	590,00	620,18	619,53	Rede Projetada
T8	N4	N8	303,82	5,08	100	150	0,55	2,80	0,851	31,47	30,63	587,01	587,00	618,48	617,63	Rede Projetada
T9	N9	N8	462,94	14,21	150	150	0,74	3,16	1,465	25,09	30,63	594,00	587,00	619,09	617,63	Rede Projetada
T10	N10	N9	304,38	39,04	250	150	0,78	2,01	0,813	25,71	25,09	594,00	594,00	619,71	619,09	Rede Projetada
T11	N10	N5	370,92	23,53	200	150	0,72	2,20	0,814	25,71	31,66	594,00	587,23	619,71	618,89	Rede Projetada
T12	N11	N10	577,11	83,43	300	150	1,18	3,53	2,036	27,74	25,71	594,00	594,00	621,74	619,71	Rede Projetada
T13	N11	N7	324,06	98,86	300	150	1,40	4,83	1,565	27,74	25,18	594,00	595,00	621,74	620,18	Rede Projetada
T14	N12	N11	181,49	200,92	300	150	2,85	17,96	3,260	29,00	27,74	596,00	594,00	625,00	621,74	Rede Projetada

Figura D.3: Resultados dos cálculos realizados pelo programa CRedes.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 17 de novembro de 2005	3. DOCUMENTO N° CTA/ITA-IEI/TC-005/2005	4. N° DE PÁGINAS 82
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Métodos para o dimensionamento de redes de abastecimento de água.			
6. AUTOR(ES): Paulo Victor Melo Sampaio			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica – ITA/IEI			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Dimensionamento de redes de abastecimento de água; Seccionamentos Fictícios; Hardy-Cross; Lógica difusa; Redes Neurais; Algoritmos Genéticos; CRedes 2001.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Sistemas de distribuição de água; Análise numérica; Abastecimento de água; Métodos matemáticos; Lógica nebulosa; Algoritmos genéticos; Redes neurais; Inteligência artificial; Matemática aplicada; Engenharia sanitária			
10. APRESENTAÇÃO: X Nacional Internacional Trabalho de Graduação, ITA, São José dos Campos, 2005. 82 páginas.			
11. RESUMO: Neste trabalho são apresentados diversos métodos de dimensionamento de redes de distribuição de água potável, tanto os classicamente utilizados para tal dimensionamento como métodos mais recentemente desenvolvidos e utilizados, fazendo uso de inteligência artificial. São feitas análises a respeito desses métodos para que sejam apontados vantagens e desvantagens de cada um. Também é analisado o <i>software</i> CRede, desenvolvido pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica da USP, o qual é utilizado no dimensionamento de uma rede em um bairro de São José dos Campos. O objetivo primordial deste Trabalho de Graduação é a aplicação destas análises no curso de HID-44: Saneamento, ministrado para o quarto ano de Engenharia de Infra-Estrutura Aeronáutica.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL () SECRETO			