



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RAIMUNDO EVALDO PONTE NETO

**AVALIAÇÃO DA CODIFICAÇÃO REAL E BINÁRIA NA IDENTIFICAÇÃO DAS
RUGOSIDADES DE TUBULAÇÕES APLICANDO ALGORITMO GENÉTICO COM
O MÉTODO TRANSIENTE INVERSO**

FORTALEZA

2021

RAIMUNDO EVALDO PONTE NETO

AVALIAÇÃO DA CODIFICAÇÃO REAL E BINÁRIA NA IDENTIFICAÇÃO DAS
RUGOSIDADES DE TUBULAÇÕES APLICANDO ALGORITMO GENÉTICO COM O
MÉTODO TRANSIENTE INVERSO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Professor John Kenedy de Araújo, PhD.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P857a Ponte Neto, Raimundo Evaldo.
AVALIAÇÃO DA CODIFICAÇÃO REAL E BINÁRIA NA IDENTIFICAÇÃO DAS RUGOSIDADES DE TUBULAÇÕES APLICANDO ALGORITMO GENÉTICO COM O MÉTODO TRANSIENTE INVERSO / Raimundo Evaldo Ponte Neto. – 2021.
89 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo.
1. Transiente Hidráulico. 2. Calibração. 3. Redes de distribuição de água. 4. Algoritmo Genético. 5. Rugosidade. I. Título.

CDD 627

RAIMUNDO EVALDO PONTE NETO

AVALIAÇÃO DA CODIFICAÇÃO REAL E BINÁRIA NA IDENTIFICAÇÃO DAS
RUGOSIDADES DE TUBULAÇÕES APLICANDO ALGORITMO GENÉTICO COM O
MÉTODO TRANSIENTE INVERSO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: ____/____/2021.

BANCA EXAMINADORA

Professor Dr. John Kenedy de Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Professor Dra. Ticiane Marinho de Carvalho Studart (Membro Interno)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Professor Dr. José Maria Brabo Alves (Membro Externo)
Universidade Estadual do Ceará

A Deus.

À Thereza e Marcelo.

AGRADECIMENTOS

Meus primeiros e eternos agradecimentos sempre serão Aquele que me deu o dom da vida, que me fez um chamado específico e a quem tento diariamente ser fiel ao seu plano de salvação para comigo, mesmo eu sendo tão falho: Deus. Até aqui me ajudou o Senhor. Se hoje concluo esse curso, foi Graça dEle que me permitiu chegar até aqui. A cada manhã, a cada respirar. Agradeço também à Santíssima Virgem Maria, que em seu silencio nunca me deixou desamparado, e por todo cuidado diário que tem comigo.

Aos meus pais, Marcelo Ponte e Thereza Góes, por todo o amparo e dedicação que me deram, principalmente nesse período em que me abstive do mercado da construção civil para me dedicar ao sonho de um mestrado. Eles foram o suporte para que eu pudesse concluir esse curso sem me desesperar financeiramente, principalmente devido a pandemia.

Agradeço também aos colegas da minha turma de mestrado, especialmente José Raimundo de Sousa e Daniel Alves Alves, que nunca me deixaram desistir do curso, por mais que inúmeras vezes tenha querido abandonar o mesmo.

A todos os colegas que estiveram presente sendo suporte nos momentos mais difíceis da vida, em especial os membros da comunidade de vida Lumen, comunidade a qual participo.

Ao meu professor e orientador John Kenedy de Araújo, que desde os tempos de graduação sempre demonstrou muita confiança na minha pessoa, sendo respeitoso, paciente e compreensível, principalmente nas minhas demoras e oscilações em concluir esse curso, mas em que nenhum momento duvidei que fosse me deixar só nessa. Pelo contrário, sinto-me muito é privilegiado por tudo que o mesmo pôde me oferecer como orientador, dando muito mais do que eu mereceria como orientado.

Ao Padre Raimundo Nonato de Oliveira Neto, meu pároco, e Padre Milton Ferreroni, nosso diretor espiritual no Centro Cultural Alvorada, por todo o crescimento espiritual que me propuseram e a constante lembrança que: para um apóstolo moderno, uma hora de estudo é uma hora de oração.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de auxílio durante parte do curso.

Começar é de muitos; acabar, de poucos. E entre esses poucos temos de estar nós, os que procuramos comportar-nos como filhos de Deus. Não o esqueçamos: só as tarefas terminadas com amor, bem acabadas, merecem o aplauso do Senhor que se lê na Sagrada Escritura: é melhor o fim de uma obra do que o seu começo. (SÃO JOSEMARÍA DE BALAGUER)

RESUMO

Desprezada por anos, seja porque antigamente as redes de distribuição de água eram mais simples ou porque o estudo era muito complexo, o estudo do transiente hidráulico se tornou de grande importância devido ao risco que causava a seus consumidores com o efeito do golpe de aríete. Com a população cada vez maior e sempre necessitando de água para seu consumo, as redes de distribuição de água estão em constante crescimento, e com isso o incremento de bombas e válvulas se torna necessário para atingir os valores mínimos e máximos de pressão, além da quantidade e qualidade de água. Para analisar um sistema hidráulico transiente, é preciso obter um modelo que represente a descrição matemática das características dele. A análise do escoamento transiente incorpora uma melhoria no modelo, uma operação economicamente mais viável e possivelmente um custo de operação mais baixo nas redes de distribuição. Porém para que se possa simular com boa precisão o comportamento da rede, os parâmetros físicos que envolvem o sistema devem ser conhecidos, resultando em valores de pressão e vazões bem próximos ao real. O processo de estimativa dos parâmetros físicos da rede hidráulica é chamado de calibração. Entre os parâmetros da rede, o de maior dificuldade de especificação é a rugosidade absoluta devido aos processos industriais e grau de acabamento da superfície, idade da tubulação, etc. Prever sua modificação com o tempo, devido à alteração da superfície da parede, muitas vezes causada pela própria qualidade da água, coloca o projetista diante do problema difícil de determinar os fatores de atrito das tubulações, exigindo experiência e bom senso. Utilizando o algoritmo genético, com operadores de elitismo, mutação e cruzamento em sua representação real e binária, no método transiente inverso, em que os parâmetros são considerados como variáveis, obteve-se um comparativo entre as funções objetivos do algoritmo genético e os erros médios relativos de ambas representações. Duas redes foram analisadas e em ambos os casos, obteve-se valores próximos da rugosidade procurada, mas com a representação real obtendo valores melhores.

Palavras-chave: Transiente hidráulico. Calibração. Redes de distribuição de água. Algoritmo Genético. Rugosidade.

ABSTRACT

Scorned for years, either because in the past water distribution networks were simpler or because the study was too complex, the study of the hydraulic transient became of great importance due to the risk it caused to its consumers with the effect of the water hammer. With the population increasing and always needing water for their consumption, the water distribution networks are constantly growing, and with this the increase of pumps and valves is necessary to reach the minimum and maximum pressure values, in addition to the quantity and quality of water. To analyze a transient hydraulic system, it is necessary to obtain a model that represents the mathematical description of its characteristics. The analysis of the transient flow incorporates an improvement in the model, an economically more viable operation and possibly a lower operating cost in the distribution networks. However, in order to simulate the network behavior with good precision, the physical parameters that involve the system must be known, resulting in pressure values and flow rates very close to the real one. The process of estimating the physical parameters of the hydraulic network is called calibration. Among the network parameters, the most difficult to specify is the absolute roughness due to industrial processes and the degree of surface finish, age of the pipe, etc. Predicting its modification over time, due to the alteration of the wall surface, often caused by the water quality itself, poses the designer before the difficult problem of determining the friction factors of the pipes, requiring experience and common sense. Using the genetic algorithm, with elitism, mutation and crossing operators in their real and binary representation, in the inverse transient method, in which the parameters are considered as variables, a comparison was obtained between the objective functions of the genetic algorithm and the average errors of both representations. Two networks were analyzed and in both cases, values close to the desired roughness were obtained, but with the real representation obtaining better values.

Keywords: Hydraulic Transient. Calibration. Water distribution network. Genetic Algorithm. Roughness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Adutora rompida pelo golpe de aríete.....	23
Figura 2.2 - Vazamento típico de deslocamento do anel de vedação.....	23
Figura 2.3 - Implantação de uma tubulação por pressão negativa.....	24
Figura 2.4 - Rompimento e vazamento em uma adutora.....	24
Figura 2.5 - Representação de um sistema de abastecimento de água	25
Figura 2.6 - Estação de Tratamento Gavião, no Ceará.....	26
Figura 2.7 - Substituição de trecho da rede de distribuição de água	27
Figura 2.8 - Exemplo de Rede ramificada.....	28
Figura 2.9 - Exemplo de rede malhada.....	29
Figura 2.10 - Linhas de energia	31
Figura 2.11 - Fluxo de água em conduto fechado	32
Figura 2.12 - Harpa de Nikuradse	34
Figura 2.13 – Rugosidade de uma tubulação.....	35
Figura 3.1 - Função $f(x)$ plotada no gráfico.....	39
Figura 3.2 - Função 3.1 plotada mostrando os mínimos locais e globais.....	40
Figura 3.3 - Valor de x encontrado no cromossomo s_1	42
Figura 3.4 - Crossover entre cromossomos	44
Figura 3.5 - Crossover em cadeia de bits.....	44
Figura 3.6 - Geração de cromossomo filho 1 por crossover uniforme.	45
Figura 3.7 - Geração de cromossomo filho 2 por crossover uniforme	45
Figura 3.8 - Operador de crossover de 4 pontos.....	46
Figura 3.9 - Mutação em duas cadeias de 6 bits.....	46
Figura 3.10 – Comparativo de algoritmos genéticos em relação ao elitismo.....	47
Figura 4.1 - Curva padrão da variação do consumo médio diário.....	51
Figura 4.2 - Reservatório a montade de rede hidráulica.....	53
Figura 4.3 - Válvula ao fim de uma tubulação	54
Figura 4.4 - Comportamento da água em fechamento brusco de uma válvula	55
Figura 4.5 - Quatro fases de um problema de fechamento instantâneo de válvula a jusante de um conduto horizontal e sem atrito	56
Figura 4.6 – Linhas características no plano $x-t$	60
Figura 4.7 - Malha de discretização do MOC	60
Figura 4.8- Válvula localizada a jusante de uma tubulação	62

Figura 5.1 - Rede hipotética 1	65
Figura 5.2 - Rede hipotética 2	66
Figura 5.3 – Indexação: seções na rede 1	68
Figura 5.4 – Indexação: seções na rede 2	69
Figura 5.5 – Indexação da rede 1.....	69
Figura 5.6 – Indexação da rede 2.....	69
Figura 5.7 - Interface de P1	70
Figura 5.8 – Interface do programa P2	72
Figura 5.9 - Interface de P3_Binária_Contínuo.....	73
Figura 5.10 - Interface do programa P3_Real_Contínuo	73
Figura 6.1 - Comparativo da função objetivo das três melhores soluções a cada geração na representação real na rede 1.....	77
Figura 6.2 - Comparativo da função objetivo das três melhores soluções a cada geração na representação binária na rede 1	79
Figura 6.3 - Comparativo da função objetivo das três melhores soluções a cada geração na representação real na rede 2.....	80
Figura 6.4 - Comparativo da função objetivo das três melhores soluções a cada geração na representação binária na rede 2	81
Figura 6.5 - Comparação entre as melhores soluções da rede 1.....	83
Figura 6.6- Comparativo do erro relativo entre as soluções da rede 1	84
Figura 6.7 - Comparação entre as melhores soluções da rede 2.....	85
Figura 6.8 - Comparativo do erro relativo entre as soluções da rede 2	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores da rugosidade absoluta para diferentes tipos de materiais	36
Tabela 4.1 - Valores típicos para a velocidade da celeridade em escoamentos de água pura ..	57
Tabela 5.1 - Características gerais das duas redes	64
Tabela 5.2 – Parâmetros físicos da rede 1	65
Tabela 5.3 – Característica dos nós na rede 1.....	66
Tabela 5.4 – Parâmetros físicos da Rede 1	67
Tabela 5.5 – Característica dos nós da rede 2.....	67
Tabela 5.6 – Cargas hidráulicas dos nós da rede 1	70
Tabela 5.7 - Vazões nos tubos da rede 1	71
Tabela 5.8 – Cargas hidráulicas dos nós na rede 2	71
Tabela 5.9 – Vazões nos tubos na rede 2.....	71
Tabela 5.10 – Representação binária e decimal das rugosidades	74
Tabela 6.1 – Melhores soluções de cada representação em cada rede	76
Tabela 6.2 - Rugosidades encontradas na rede 1 na representação real	78
Tabela 6.3 - Rugosidades encontradas na rede 1 na representação binária	79
Tabela 6.4 - Rugosidades da rede 2 na representação real	80
Tabela 6.5 - Rugosidades da rede 2 na representação real	81
Tabela 6.6 - Comparação entre as rugosidades das melhores soluções na rede 1	83
Tabela 6.7 - Comparativo entre as melhores rugosidades da rede 2	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 - Expressões de Ψ	57
Quadro 5.1 - Código para indexação dos nós de acordo com os tipos possíveis.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmo Genético
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
MTI	Método Transiente Inverso
MOC	Método das Características
SAA	Sistema de Abastecimento de Água

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
kPa	KiloPascal
hab	Habitante
hPa	HectoPascal
L	Comprimento/Litro
m	Metro
m ³	Metro cúbico
mca	Metro de coluna d'água
mm	Milímetro
Pop	População
s	Segundo
Q	Vazão
f	fator de atrito
ρ	massa específica
γ	Peso específico
V	Velocidade média
V _o	Velocidade inicial
α	Celeridade
ϵ	Rugosidade
ν	Poisson
NG	Número de Gerações

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contextualização e problematização	19
1.2	Objetivos	20
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	20
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	20
1.3	Estrutura do trabalho	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	Sistemas de abastecimento de água	22
2.2	Redes de distribuição de água	26
2.3	Carga nas redes de abastecimento de água.....	29
2.3.1	<i>A perda de carga e o fator de atrito</i>	31
2.3.2	<i>A rugosidade.....</i>	35
3	ALGORITMO GENÉTICO	37
3.1	A teoria Darwnista e a otimização	37
3.2	Terminologia Biológica.....	38
3.3	Estrutura dos Algoritmos Genéticos	39
3.4	A representação binária dos parâmetros.....	41
3.5	Seleção	43
3.6	Crossover e mutação na representação binária	43
3.7	Elitismo.....	47
3.8	O Algoritmo genético e sua representação real	47
3.9	Crossover e mutação em algoritmo genético na representação real	48
4	MODELO HIDRÁULICO	50
4.1	Introdução.....	50
4.2	A celeridade	53
4.3	Modelo da coluna elástica e o método das características.....	58
4.4	Condições de contorno	62
5	METODOLOGIA APLICADA	63
5.1	Rede 1	65
5.2	Rede 2	66
5.3	A Indexação	67
5.4	Carga nos nós em Regime Permanente	70

5.4.1 Cargas no regime permanente nos nós da rede 1	70
5.4.2 Cargas no regime permanente nos nós da rede 2	71
5.5 Carga nos nós e vazões nos tubos em Regime Transiente	71
5.6 Simulação das Rugosidades em Regime transiente	72
5.7 Função objetivo em regime transiente	74
5.8 Configuração do algoritmo genético.....	74
5.9 Medida de eficiência da identificação da rugosidade.....	75
6 RESULTADOS E CONCLUSÕES	76
6.1 Resultados	76
6.1.1 Nova função objetivo da Rede 1	77
6.1.1.1 Representação real	77
6.1.1.2 Representação binária.....	78
6.1.2 Nova função objetivo da Rede 2	79
6.1.2.1 Representação real	79
6.1.2.2 Representação binária.....	81
6.2 Conclusões.....	82
6.2.1 Rede 1.....	82
6.2.2 Rede 2.....	84
6.2.3 Conclusão final	86
6.3 Recomendações para próximas pesquisas	87
REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e problematização

O crescimento populacional sempre foi um dos principais fatores que estimularam as escolhas de uma economia. A economia, palavra provinda do grego *oikonomos*, que significa a organização da casa, é o estudo de como a sociedade administra seus recursos escassos. E recursos escassos significam que a sociedade tem recursos limitados e, portanto, não pode produzir todos os bens e serviços que as pessoas desejam ter (MANKIW, 2015).

Entre os recursos limitados, a água é necessária para os mais de 7,5 bilhões de habitantes no planeta terra, fora o mundo vegetal e animal que também é dependente da mesma.

Existem os órgãos responsáveis por alocar o recurso hídrico em diferentes setores como a irrigação, o abastecimento humano, a indústria, o reino animal e entre outros. No abastecimento humano, as companhias de água buscam a cada dia ampliar seus sistemas de abastecimento de água para que mais e mais habitantes tenham acesso a água potável. No próprio estado do Ceará, por exemplo, são necessários caminhões pipa e perfuração de poços para consumo de água subterrânea para que inúmeros habitantes tenham acesso a água, caso ainda não se tenha a rede distribuidora de água.

Apesar da preocupação e dedicação em ampliar as redes de água, seja por novos troncos ou novos ramais, as companhias sofrem com um fator bastante inconveniente: as perdas de águas. A SABESP (SABESP, 2011) em seu balanço hídrico demonstrou que 960 milhões de metros cúbicos de água foram perdidos na rede de distribuição de São Paulo, o equivalente a 32% do volume produzido. Quando se fala de perda de água, elas são divididas em dois grupos: as perdas reais e as perdas aparentes.

As perdas aparentes são as perdas no faturamento: ligações clandestinas e irregulares, sem hidrômetro, erros de leitura, hidrômetros com problemas na medição, as ligações inativas reabertas. As perdas reais são as perdas físicas, causadas principalmente por vazamentos em reservatórios, adutoras, redes, ramais ou hidrômetros. As causas dos vazamentos podem ser várias, tais como dimensionamento errado de um sistema, vedação malfeita, perfuração da rede por terceiros, a mudança brusca de vazão e pressão interna da tubulação.

Desprezada por anos, devido ao grau de dificuldade nos estudos, as variações de pressão e vazão ganharam força nos estudos após os golpes de aríete terem danificado inúmeras redes. Com o constante crescimento das redes, e alteração de vazões e pressões, as redes

precisarão passar por uma modelagem para saber se seus fatores, tais como pressão, diâmetro, coeficiente de rugosidade, fator de atrito ainda estão aptos ou caminham para serem condenados a colapsar naquele sistema.

E apesar do estudo de uma rede transiente ser de fácil compreensão qualitativa, mas complexa no quantitativo, a computação e os métodos numéricos tornaram o processo mais rápido, buscando sempre otimizar os problemas. Entre os métodos numéricos unidos a computação, o algoritmo genético pode ser testado para verificação dos fatores através do método transiente inverso.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Esta dissertação tem como objetivo principal identificar os coeficientes de rugosidade das tubulações de duas redes hidráulicas utilizando o algoritmo genético, na representação real e binária, em regime transiente ocasionado pela variação da demanda em nós específicos da rede e em tempos pré-determinados.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

1. Calcular as cargas hidráulicas transientes e permanentes nos nós;
2. Identificar as rugosidades dos tubos utilizando algoritmo genético;
3. Calcular as funções objetivo para encontrar as melhores soluções de rugosidades para o transiente;
4. Comparar as soluções ótimas encontradas nas duas representações;
5. Utilizar o Erro Médio Relativo (EMR) e o Erro Relativo (ER) no processo de identificação das rugosidades em cada uma das representações.

1.3 Estrutura do trabalho

A presente dissertação está dividida em seis capítulos. O primeiro capítulo aborda uma introdução ao crescimento das redes de distribuição de água e com isso a variação de

pressões e vazões, fazendo-se necessário os estudos de redes transientes, bem como a necessidade de descobrir os fatores de suas redes. Além disso, o primeiro capítulo também trata dos objetivos geral e específicos.

O capítulo dois apresenta uma revisão bibliográfica tratando de assuntos introdutórios no Sistema de abastecimento de água e com foco maior para o entendimento das redes de distribuição de água, tais como os elementos constituintes dos projetos de redes de abastecimento de água, como as redes se distribuem, as suas perdas de carga e os fatores para o cálculo das perdas.

No terceiro capítulo são apresentadas definições de algoritmo genético, sua origem a partir da teoria Darwinista, os termos provindos da biologia para o campo do algoritmo, como são as representações reais e binárias, como as populações desse método são geradas, o funcionamento dos operadores de mutação e crossover (cruzamento), o fator elitismo, função objetivo, além da explicação da geração de novos cromossomos filhos.

O capítulo quatro aborda o modelo hidráulico, como o escoamento transiente se comporta nas tubulações, as causas dele, se o fechamento de uma válvula é brusco ou lento; é apresentado o modelo da coluna rígida e elástica, porém com ênfase apenas na coluna elástica, as equações fundamentais do método das características e suas condições de contorno, se tornando possível calcular as cargas em um instante t no regime transiente.

No capítulo cinco, é abordado a formulação do problema inverso e as estratégias de resolução, mostrado as redes hipotéticas, seus parâmetros conhecidos, vazões iniciais e tornando a metodologia aplicada nas redes hipotéticas, calculando-se as cargas permanentes nos nós e as cargas transientes, e com isso sendo possível simular as rugosidades nas tubulações da rede e comparando-se com as rugosidades reais.

Finalmente, no capítulo seis são apresentados os resultados das funções objetivas atingidas nos nós monitorados e as conclusões decorrentes das simulações nas modelagens realizadas no capítulo cinco. Analisa-se as soluções ótimas decorrentes da representação binária e real e ambas são comparadas. Também são feitas sugestões para próximas pesquisas relacionadas ao tema da presente dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas de abastecimento de água

Não é raro um noticiário brasileiro informar que determinada região de uma cidade irá ficar sem o fornecimento de água na região devido a vazamentos, limpezas da rede ou a própria ampliação da mesma. Todos esses ajustes são feitos em determinada área de um conjunto chamado de sistema de abastecimento de água (SAA).

Azevedo Netto *et al* (1998) definiu o SAA como um conjunto de obras, equipamentos e serviços empregados no abastecimento de água potável. A finalidade dessa água potável pode ser o uso doméstico, industrial, serviços públicos, comercial, entre outros. Para Porto (2006), além dos padrões de potabilidade, como condições sanitárias de quantidade e qualidade, a água deve obedecer a padrões também de vazão e de pressão para o atendimento da população.

A vazão, representada pela letra Q , corresponde a medida de quanto de volume de água é fornecida em um determinado intervalo de tempo. Se uma torneira é aberta e em um minuto consegue encher uma garrafa de 600mL, diz-se que a torneira obteve vazão Q [L^3T^{-1}] de 10mL/s.

A pressão interna de uma tubulação, representada pela letra P [$M^1L^{-1}T^{-2}$], que é relativa a pressão atmosférica, deve estar em constante controle. Se muito baixa, não é capaz de levar água até determinadas cotas. Se muito alta, é capaz de romper a tubulação.

A pressão excessiva de água não só aumenta o volume de água perdido pelos vazamentos, mas também influencia no aumento do número de quebras de tubulação. (THORNTON; STURM; KUNKEL, 2008).

Caso a pressão interna de uma tubulação seja muito menor que a pressão externa, é possível que a tubulação sofra uma implosão. Além de ser necessário manter a pressão dentro de limites estabelecidos, Porto (2006) atenta para o fato de efeitos originados do fenômeno do golpe de aríete, que é a variação de pressão que ocorre em uma tubulação como consequência de mudança na velocidade média devido a uma manobra relativamente brusca dos registros.

Na Figura 2.1 e Figura 2.2, adutoras que sofreram golpe de aríete. Na imagem 2.2, vazamento típico de deslocamento do anel de vedação decorrente das variações bruscas das pressões transitórias. Na Figura 2.3, a pressão interna foi muito menor que a pressão externa, ocasionando a implosão da tubulação. Na Figura 2.4, a pressão elevada causou o rompimento e vazamento em uma adutora.

Figura 2.1 - Adutora rompida pelo golpe de aríete



Fonte: proencis.site.com.br/consultoria, em Janeiro de 2021.

Figura 2.2 - Vazamento típico de deslocamento do anel de vedação



Fonte: <https://www.revistatae.com.br/Artigo/4/a-importancia-de-calculos-de-transiente-hidraulico-em-tubulacoes>, em Janeiro de 2021.

Figura 2.3 - Implantação de uma tubulação por pressão negativa



Fonte: sgpam.com.br/artigos/transiente-hidraulico, em Janeiro de 2021.

Figura 2.4 - Rompimento e vazamento em uma adutora



Fonte: proencis.site.com.br/consultoria, em Janeiro de 2021.

Segundo Melato (2010), o controle de pressão se apresenta como uma ação efetiva na diminuição do volume de perda de águas, visíveis ou não visíveis, nos sistemas de distribuição de água, além de que o seu controle visa adequar as pressões em valores compatíveis com uma boa operação do sistema, minimizando as altas pressões e variações bruscas sem deixar de garantir as pressões mínimas de atendimento aos consumidores.

Claro que na prática existem as intempéries e muita coisa pode mudar, mas na teoria, ali no planejamento, na criação do projeto, busca-se ao máximo se adiantar aos prováveis problemas que possam vir a ter no sistema de abastecimento e tentar minimizá-los. Com isso,

o SAA deve ser muito bem projetado, com boa manutenção e operação para que proteja os consumidores contra quaisquer riscos à saúde (BEZERRA; CHEUNG, 2013).

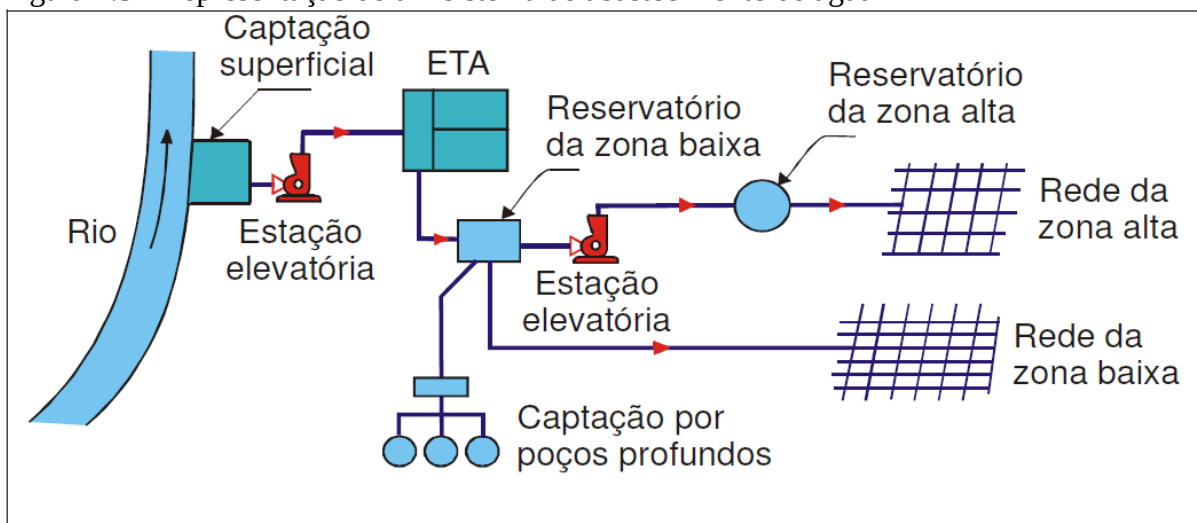
Para PORTO (2006), o projetista merece dar atenção especial aos parâmetros do sistema, nas metodologias e cálculos assumidos, a fim de conseguir um projeto eficiente.

Esse conjunto de SAA é bastante amplo, contendo geralmente:

1. Mananciais;
2. Captação;
3. Estação elevatória de água bruta;
4. Adutora de água bruta;
5. Estação de tratamento de água;
6. Estação elevatória de água tratada;
7. Adutora de água tratada;
8. Reservação;
9. Rede de distribuição.

A redes de distribuição são mais visíveis para a população como um todo. Na Figura 2.5, uma representação de todo o procedimento de um SAA no qual as setas vermelhas indicam o sentido da água. Na Figura 2.6, a Estação de Tratamento de Água Gavião, antecedida pela estação elevatória, e a captação do manancial.

Figura 2.5 - Representação de um sistema de abastecimento de água



Fonte: Orsini (1996).

Figura 2.6 - Estação de Tratamento Gavião, no Ceará



Fonte: blogdoeliomar.com.br/2018/07/26/cagece-realiza-servicos-de-recuperacao-dos-filtros-da-eta-gaviao/, em Janeiro de 2021

2.2 Redes de distribuição de água

As redes de distribuição são a parte mais vista pela população porque são elas que fornecem continuamente água potável atendendo os requisitos mínimos de qualidade, quantidade e pressão aos consumidores residenciais, comerciais, industriais e de serviços, em aglomerações urbanas, cidades ou vilas. Heller (2010) define as redes de distribuição como a unidade do sistema de abastecimento de água formada por tubulações e órgãos acessórios instalados em logradouros públicos. Esses acessórios podem ser válvulas, registros, curvas, tês, cotovelos, entre outros.

O nome rede de distribuição refere-se ao formato que suas tubulações se interligam, podendo apresentar diferentes formatos, tais como rede malhada e rede ramificada. Na Figura 2.7, uma equipe da CAGECE faz a troca de uma tubulação de concreto – que rotineiramente apresentava vazamentos não visíveis - por uma tubulação de PVC, no bairro Aldeota, em Fortaleza. Na imagem é possível ver o solo úmido pelo vazamento e a tubulação de PVC na cor azul, ao lado esquerdo da figura. Segundo Heller (2010), as redes de distribuição são responsáveis por mais de 50% do custo de implantação do projeto.

Figura 2.7 - Substituição de trecho da rede de distribuição de água



Fonte: Arquivo pessoal.

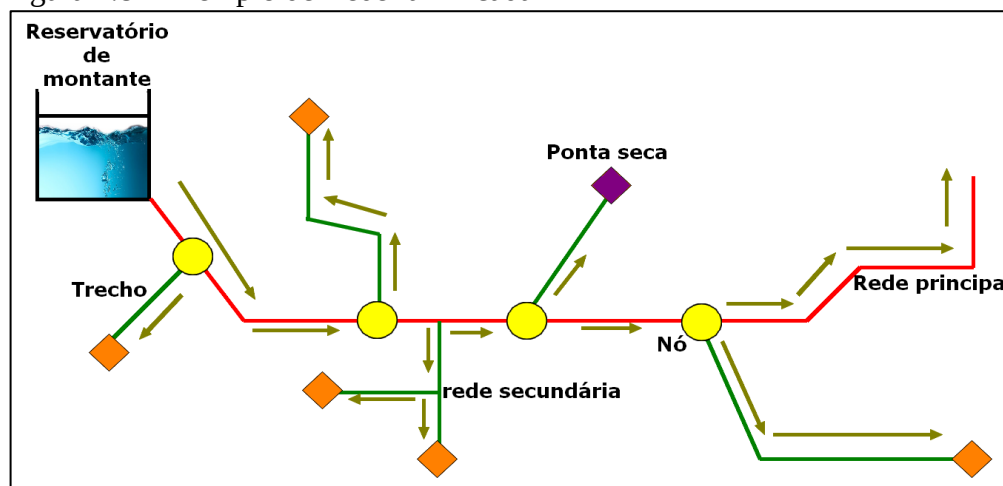
A ABNT/NBR 12218/2017 classifica os condutos em dois tipos na rede de distribuição: os principais e os secundários. Os principais – que recebem também o nome de tronco – são os responsáveis por alimentar os condutos secundários, além de apresentarem maior diâmetro. Já os condutos secundários são os responsáveis pelo abastecimento dos postos de consumo.

Quando as tubulações da rede são dispostas em formatos de malhas, ela recebe o nome de rede malhada. Quando as tubulações são dispostas em ramos, recebe o nome de ramificada. Entretanto, é comum em uma rede ocorrer o traçado misto, que é a combinação desses dois tipos. Segundo Porto (2006), a classificação de rede ramificada se dá quando a os condutos principais são alimentados por um reservatório à montante, ou sob pressão de um bombeamento. Como os condutos principais abastecem os condutos secundários, o sentido da vazão em qualquer trecho dela será conhecido. Há apenas um sentido para o escoamento. Embora seja mais simples e seu custo bem mais barato que uma rede malhada de mesmo porte, um possível vazamento ou até manutenção no início do conduto principal prejudicará todo o restante da rede. Em uma região metropolitana ela se torna muitas vezes inviável, pois o abastecimento não pode ser paralisado em toda região.

Tais redes são empregadas principalmente no abastecimento de sistemas de irrigação pressurizados, em pequenas comunidades e em urbanizações particulares (BEZERRA

E CHEUNG, 2013; GOMES, 2009). Um exemplo simples de rede ramificada é a contida na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Exemplo de Rede ramificada



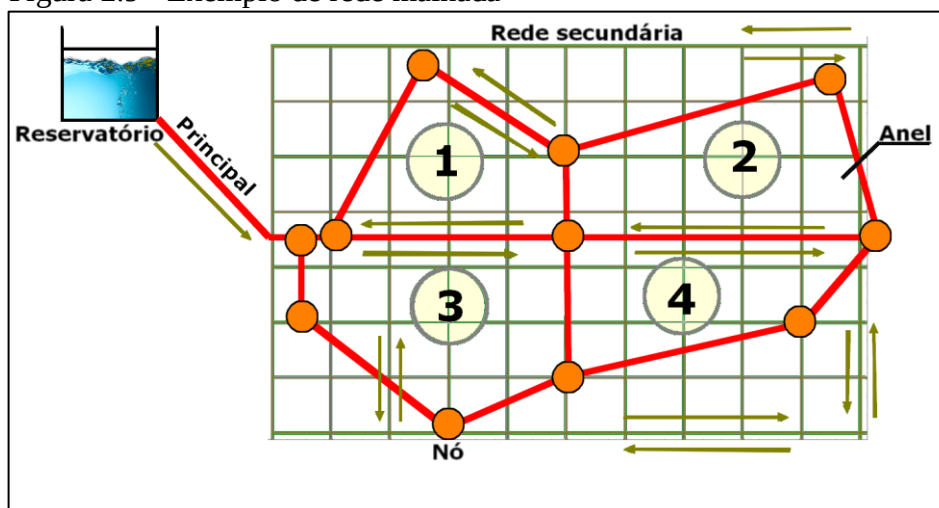
Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 2.8, alguns termos novos apareceram, como ponta seca, trecho e nó. Gomes (2009) explica a nomenclatura de cada uma dessas partes. O trecho compreende cada um dos percursos da rede de distribuição em que a vazão permanece constante; o nó é o ponto de conexão entre dois trechos. Nos nós se produzem modificações na vazão circulante; caso tenha mais de dois trechos conectados nesse nó, esse será chamado de nó de derivação. O ramal são os trechos conectados em série sem nenhum nó de derivação; a alimentação da rede é a origem da rede de distribuição. Normalmente coincide com o ponto inicial do sistema de transporte, onde se localiza o reservatório de distribuição ou o bombeamento direto. Algumas redes ramificadas são alimentadas diretamente por mais de um reservatório.

O outro modelo de rede existente são as redes malhadas. Porto (2006) as define como redes formadas por tubulações tronco que formam anéis ou malhas, nos quais há possibilidade de reversibilidade no sentido das vazões em função das solicitações de demanda. Assim, pode-se abastecer qualquer ponto do sistema por mais de um caminho, o que permite uma maior flexibilidade em satisfazer a demanda e na realização da manutenção da rede com o mínimo de interrupção no fornecimento de água.

Esse é o caso mais comum nas grandes cidades. É a rede que permite um conserto de vazamento ou substituição de condutos sem afetar toda área da cidade. O seu desenvolvimento é em várias direções, como o mostrado na Figura 2.9.

Figura 2.9 - Exemplo de rede malhada



Fonte: Elaborado pelo autor

2.3 Carga nas redes de abastecimento de água

Se em alguns casos a rede ramificada parece fácil de saber a trajetória do fluxo que a água tomará na rede, na rede malhada isso se altera bruscamente, pois ela pode ora estar em uma direção, ora em outra direção. Isso tudo ocorre porque cada ponto determinado da rede possui uma energia, chamada de carga.

Porto (2006) define líquidos perfeitos como líquidos que não se manifestam os efeitos de viscosidade e define um escoamento em regime permanente como aquele em que as propriedades e características hidráulicas, em cada ponto do espaço, forem invariantes no tempo. Os regimes em que as propriedades e características se alteram é chamado de regime transiente. Daniel Bernoulli criou um teorema para líquidos perfeitos e regimes permanentes em que se é possível encontrar a carga total H , por unidade de peso do líquido. A equação (2.1) representa a equação de Bernoulli.

$$H = \frac{P}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g} = cte \quad (2.1)$$

Na equação 2.1, P representa a pressão relativa no ponto; γ [$M^2L^{-3}T^{-2}$] o peso específico do fluido; Z [$M^0L^1T^0$] representa a cota do ponto adotada a partir de um referencial; v [$M^0L^1T^{-1}$] é a velocidade média do fluido naquele ponto; g [$M^0L^1T^{-2}$] a gravidade. Pela equação do movimento (2.2), é possível encontrar a relação de cargas entre dois pontos.

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H_{1,2} + \frac{1}{g} \int_1^2 \frac{\partial V}{\partial t} ds \quad (2.2)$$

O fator $\Delta H_{1,2}$ [$M^1L^0T^0$] representa a energia gasta para vencer as forças de atrito no deslocamento entre os pontos 1 e 2, e está associada, portanto, a uma perda de energia ou perda de carga no escoamento de um fluido real. Na ausência de bombas, a trajetória do fluido será do ponto de maior carga para o ponto de menor carga.

Como o termo $\partial V / \partial t$ representa aceleração local, sendo independente da direção s , a integral entre os pontos 1 e 2 da linha de corrente pode ser efetuada, tornando a equação (2.3).

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H_{1,2} + \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \quad (2.3)$$

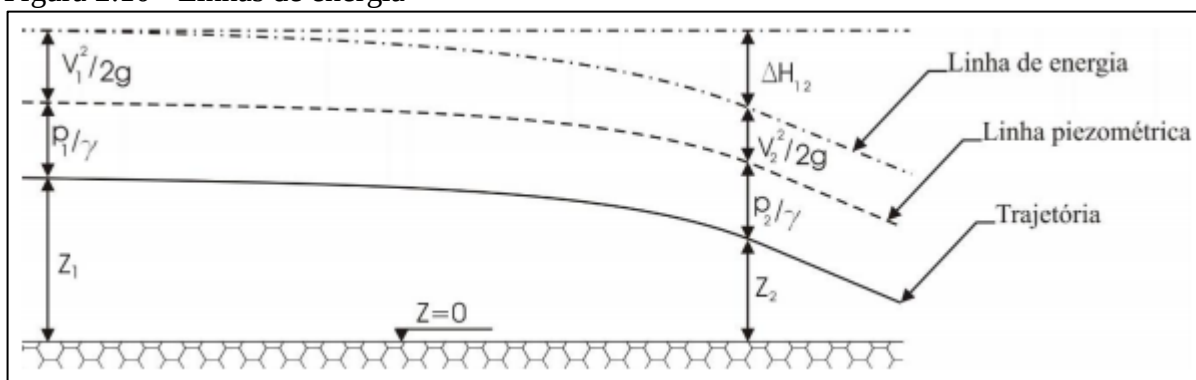
L [$M^0L^1T^0$] é o comprimento do arco entre os dois pontos. Considerando um escoamento permanente, o último termo dessa equação se torna nulo. Sendo assim, cada parcela dessa representa a energia por unidade de peso – tendo como medida o metro – sendo denominadas assim:

- P/γ (m) – energia ou carga de pressão;
- Z (m) – carga de posição, energia potencial de posição em relação a um plano horizontal de referência;
- $V^2/2g$ (m) – energia ou carga cinética;
- ΔH (m) – perda de carga ou de energia.

Segundo Porto (2006), conhecendo a trajetória de um filete de líquido, identificada pelas cotas geométricas em relação a um plano horizontal de referência, pode-se representar os valores da energia de pressão, obtendo-se o lugar geométrico dos pontos cujas cotas são dadas por $p/\gamma + z$ e designando como linha de carga efetiva ou linha piezométrica. O valor dessa soma é chamado de cota/carga piezométrica. Se acima dessa linha acrescentarem os valores da carga cinética, obtém-se a linha de cargas totais ou linha de energia, designando a sua carga total por unidade de peso de líquido, na forma demonstrada no teorema de Bernoulli.

A Figura 2.10 - Linhas de energia. A Figura 2.10 demonstra as linhas de energias e a linha piezométrica permanente.

Figura 2.10 - Linhas de energia



Fonte: adaptado de Porto (2006).

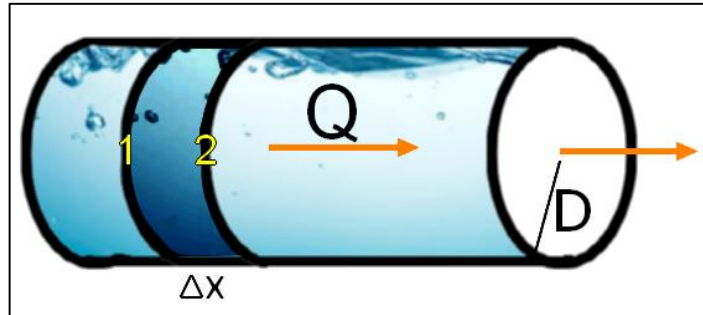
2.3.1 A perda de carga e o fator de atrito

Essa perda de carga é causada devido ao atrito da parede da tubulação e a viscosidade do fluido, além da turbulência gerada nas mudanças de direções do escoamento em que as moléculas da água se chocam dissipando a perda de energia. Entendimento qualitativo dessa perda de carga é simples. Porém calcular essa perda para que se possa encontrar a carga em um ponto específico pode levar um pouco mais de trabalho. Para Porto (2006), estudos de análise dimensional aplicadas ao escoamento forçados incluindo número de Euler, número de Reynolds, Rugosidade Relativa e a relação L/D - em que L é o comprimento da tubulação [$M^0L^1T^0$] e D o seu diâmetro [$M^0L^1T^0$] - chegaram a uma relação adimensional, em que uma experiência mostrou que a queda de pressão é diretamente proporcional à relação L/D , e que uma função envolvendo Número de Reynolds e a rugosidade relativa pode, experimentalmente, representar o fator de atrito f . Sendo assim, a perda de carga pode ser encontrada pela seguinte fórmula, que é conhecida como fórmula universal de perda de carga ou equação de Darcy-Weisbach:

$$\Delta H = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.4)$$

O fator de atrito f é adimensional. A velocidade [$M^0L^1T^{-1}$] tem unidade de m/s. Gravidade [$M^0L^1T^{-2}$], m/s^2 . D e L tem unidades de metro (m) [$M^0L^1T^0$]. A perda de carga também tem medida de metro (m) [$M^0L^1T^0$]. Considerando uma tubulação que tenha um diâmetro D . A tubulação está com uma vazão Q de água. Um filete de água percorre Δx metros, do ponto 1 ao ponto 2, - Figura 2.11 - no intervalo de Δt . No mesmo período, a quantidade de água que sai é igual ao volume entre os pontos 1 e 2.

Figura 2.11 - Fluxo de água em conduto fechado



Fonte: Elaborado pelo autor

Esse volume entre os dois pontos pode ser encontrado através da equação:

$$Vol = \pi \frac{D^2}{4} \Delta x \quad (2.5)$$

Porém a vazão é calculada como:

$$Q = \frac{Vol}{\Delta t} \quad (2.6)$$

Substituindo a equação (2.5) na (2.6), obtém-se:

$$Q = \pi \frac{D^2}{4} \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.7)$$

O último termo da equação representa a velocidade média do fluxo, V [$M^0L^1T^{-1}$]. Sendo assim, a vazão Q [$M^0L^3T^{-1}$] também pode ser encontrada multiplicando-se a área transversal da tubulação multiplicada pela velocidade média.

Olhando a equação (2.4), o fator de atrito f portanto seria o último termo necessário para se encontrar a perda de carga entre dois pontos em um escoamento. Porém o mesmo dependerá de inúmeros outros fatores. O primeiro deles é saber qual o tipo de escoamento. Segundo Porto (2006), existe o escoamento laminar e o escoamento turbulento. O escoamento é classificado como laminar quando as partículas se movem ao longo de trajetórias bem definidas, em lâminas ou camadas, cada uma delas preservando sua identidade no meio. Neste tipo de escoamento, é preponderante a ação da viscosidade do fluido no sentido de amortecer a tendência de surgimento da turbulência. Em geral, este escoamento ocorre em baixas

velocidades e ou em fluidos muito viscosos, que não são os casos mais frequentes na hidráulica. No escoamento turbulento, as partículas do líquido movem-se em trajetórias irregulares, com movimento aleatório, produzindo uma transferência de quantidade de movimento entre regiões da massa líquida. Essa é a situação mais comum nos problemas práticos da engenharia.

Um identificador do tipo de escoamento é o chamado número de Reynolds, Re , número adimensional que é encontrado através da fórmula:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.8)$$

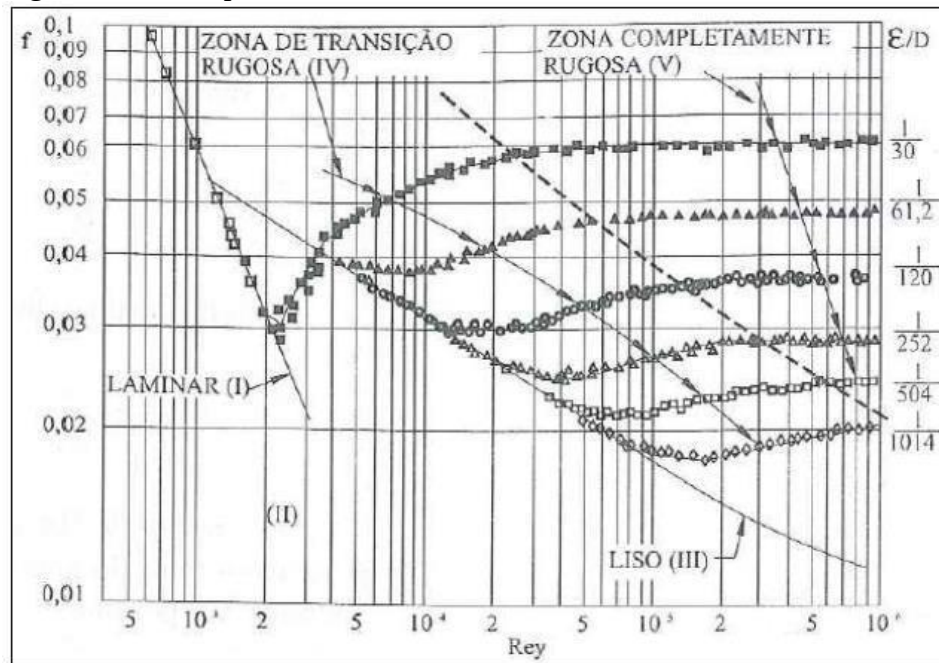
O termo ρ representa a massa específica [$M^1L^{-3}T^0$]. O termo V representa a velocidade média [$M^0L^1T^{-1}$]. D , o diâmetro da tubulação naquele ponto [$M^0L^1T^0$]. O termo μ representa a viscosidade dinâmica do fluido [$M^1L^{-1}T^{-1}$].

Quando se compara a equação universal da perda de carga (equação 2.4) com a fórmula - obtida experimentalmente por Hagen em 1839 e, um ano mais tarde, teoricamente por Poiseuille, em – de Hagen-Poiseuille, leva-se a seguinte igualdade:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.9)$$

Esse estudo é válido apenas para o escoamento laminar, independente da rugosidade, e tem comprovação experimental válida para $Re \leq 2.300$. Em 1933, J. Nikuradse publicou os resultados de um estudo de trabalho experimental para a determinação do fator de atrito. Deste estudo, foi possível levantar para os escoamentos turbulentos as relações entre o fator de atrito f , o número de Reynolds Re , e a rugosidade relativa ϵ/D . O estudo contemplou um gráfico que resumia os resultados dos testes e permite uma análise fenomenológica de cinco regiões apresentadas. Esse gráfico é chamado de Harpa de Nikuradse e é o gráfico da Figura 2.12.

Figura 2.12 - Harpa de Nikuradse



Fonte: Porto, 2006.

Porto (2006) definiu essas cinco regiões do gráfico da seguinte forma:

- Região I – $Re < 2300$, escoamento laminar, o fator de atrito independe da rugosidade, devido ao efeito da subcamada limite laminar e vale $f=64/Re$
- Região II – $2300 < Re < 4000$, região crítica onde o valor de f não fica caracterizado
- Região III – curva dos tubos hidráulicamente lisos, influência da subcamada limite laminar, o fator de atrito só depende do número de Reynolds. Escoamento turbulento hidráulicamente liso.
- Região IV – transição entre o escoamento turbulento hidráulicamente liso e rugoso, o fator de atrito depende simultaneamente da rugosidade relativa e do número de Reynolds
- Região V – turbulência completa, escoamento hidráulicamente rugoso, o fator de atrito só depende da rugosidade relativa e independe do número de Reynolds.

Em tubos lisos, o fator de atrito pode ser encontrado através da equação:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(Re\sqrt{f}) - 0,8 \quad (2.10)$$

Em tubos rugosos, é possível encontrar através da equação:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(\frac{3,71D}{\epsilon} \right) \quad (2.11)$$

Devido à complexidade em encontrar o fator de atrito, algumas fórmulas explícitas e aproximadas têm sido apresentadas na literatura, entre elas a de Swamme-Jain:

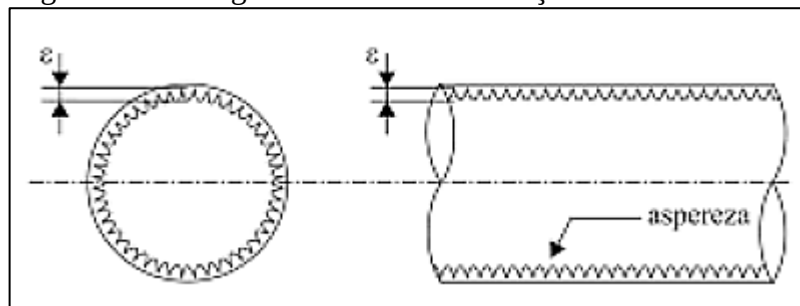
$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (2.12)$$

Entretanto, a fórmula de Swamme-Jain exige alguns requisitos. Esses são: $10^{-6} \leq \epsilon/D \leq 10^{-2}$ e $5000 \leq Re \leq 10^8$.

2.3.2 A rugosidade

Até o presente momento no texto, muito se falou na rugosidade absoluta e relativa em equações que contenham a mesma, porém não se explicou o que era a mesma. A rugosidade absoluta é a altura média das irregularidades presentes nas paredes da tubulação, como na Figura 2.13. A rugosidade relativa é a razão entre a rugosidade absoluta $[M^0L^1T^0]$ e o diâmetro da tubulação $[M^0L^1T^0]$.

Figura 2.13 – Rugosidade de uma tubulação



Fonte: slideplayer.com.br/slide/1844675, novembro de 2020

Conforme Porto (2006), as rugosidades absolutas equivalentes dos diversos materiais utilizados na prática de condução de água são de difícil especificação, devido aos processos industriais e grau de acabamento da superfície, idade da tubulação, etc. Prever sua modificação com o tempo, devido à alteração da superfície da parede, muitas vezes causada

pela própria qualidade da água, coloca o projetista diante do problema difícil de determinar os fatores de atrito das tubulações, exigindo experiência e bom senso.

Na literatura é possível encontrar valores da rugosidade para diversos materiais, tendo variações em largas faixas e até valores diferentes para o mesmo material.

A Tabela 2.1 traz valores da rugosidade absoluta equivalente para diferentes tipos de materiais. Seus valores médios são resultados de testes sobre determinados materiais.

Tabela 2.1 – Valores da rugosidade absoluta para diferentes tipos de materiais

Material	ϵ (mm) Rugosidade Absoluta equivalente
Aço comercial novo	0,045
Aço laminado novo	0,04 a 0,10
Aço soldado novo	0,05 a 0,10
Aço soldado limpo, usado	0,15 a 0,20
Aço soldado moderadamente oxidado	0,15 a 0,20
Aço soldado revestido de cimento centrifugado	0,10
Aço laminado revestido de asfalto	0,05
Aço rebitado novo	1 a 3
Aço rebitado em uso	6
Aço galvanizado, com costura	0,15 a 0,20
Aço galvanizado, sem costura	0,06 a 0,15
Ferro forjado	0,05
Ferro fundido com leve oxidação	0,30
Ferro fundido centrifugado	0,05
Ferro fundido em uso com cimento centrifugado	0,10
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,12 a 0,20
Ferro fundido oxidado	1 a 1,5
Cimento amianto novo	0,025
Concreto centrifugado novo	0,16
Concreto armado liso, vários anos de uso	0,20 a 0,30
Concreto com acabamento normal	1 a 3
Concreto protendido Freyssinet	0,04
Cobre, latão, aço revestido de epóxi, PVC, plásticos em geral, tubos extrudados	0,0015 a 0,010

Fonte: Porto (2006)

3 ALGORITMO GENÉTICO

3.1 A teoria Darwnista e a otimização

Entre inúmeras coisas que contém um misto de beleza e mistério, uma delas chama mais atenção e pode ser facilmente percebida através de suas leis: a natureza e os seres vivos. E tudo começa a ficar visível ali mesmo na hora de um parto. Uma cadela que por si só corta o cordão umbilical, uma ninhada de porcos que recém chegam ao mundo e diretamente vão atrás das tetas da leitoa sem que alguém lhes diga o que é para fazer, a própria teoria evolucionar de que o homem andaria antes encurvado e seu corpo com o passar dos anos começaria a ficar mais ereto. Aparentemente, o naturalista e fisiologista inglês Charles Darwin também observou essa beleza e afirmou, em 1859, que quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será a sua chance de sobreviver e gerar descendentes.

Melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente. De fato, o ser humano, pelo menos, sempre procurou se adaptar. Em períodos muito frios, procurava uma forma de se aquecer. Em períodos escassos de alimentos industrializados, uma fuga pelos produtos naturais. Em períodos com dificuldade de locomoção, o que hoje parece ser trivial, na época foi uma grande revolução: a invenção da roda, por exemplo. O próprio projeto da roda foi um processo de otimização. Quando se fala da teoria da aptidão, considera-se como uma provável história a evolução das girafas em que aquelas que tinham maior pescoço conseguiam comer dos frutos mais altos enquanto as demais morriam de fome.

Inúmeras formas foram tentadas até encontrar a que melhor se locomovesse. A otimização é exatamente a busca da melhor solução para um dado problema, ela consiste em tentar várias soluções e utilizar a informação obtida neste processo de forma a encontrar soluções cada vez melhores.

Quem nasceu até início da década de 90 pode ter testemunhado a dificuldade que era conseguir uma boa imagem na televisão, ficava-se alternando a posição da antena até conseguir uma resposta ótima, uma imagem limpa. Isso quando não se apelava para o uso de palha de aço na ponta das mesmas. Um exemplo clássico de otimização na vida de muitos brasileiros.

John Holland (HOLLAND, 1975) introduziu um conceito inspirado nos mecanismos de evolução de populações de seres vivos e a busca pela otimização, porém quem popularizou o mesmo foi seu aluno, David Goldberg (GOLDBERG, 1989). Esse conceito é mundialmente conhecido como Algoritmo Genético - AG -, e segue o princípio da seleção

natural e sobrevivência do mais apto. Busca-se otimizar soluções através de processos de crossovers (cruzamentos) e mutações, mas que serão abordados mais adiante. Cada solução encontrada será associada a uma nota, que será avaliada através da função objetivo, também chamada de função de aptidão.

3.2 Terminologia Biológica

Antes de dar prosseguimento ao que possa ser uma função objetivo ou aptidão, é importante frisar que o nome algoritmo genético se remete exatamente a genética da biologia, a genética de Gregor Mendel. Pela teoria de Darwin, na biologia, a evolução diz que o meio ambiente seleciona, em cada geração, os seres mais aptos de uma população para sobrevivência. Como resultado, somente os mais aptos conseguem se reproduzir, uma vez que os menos adaptados geralmente são eliminados antes de gerarem descendentes. Durante a reprodução, ocorrem fenômenos como mutação e crossover, entre outros, que atuam sobre o material genético armazenado nos cromossomos. Estes fenômenos levam a variabilidade dos seres vivos na população. Sobre esta população diversificada age a seleção natural, permitindo a sobrevivência apenas dos seres mais adaptados (LACERDA; CARVALHO, 1999).

O algoritmo genético é exatamente uma metáfora desses fenômenos, por isso que é comum encontrar termos originados da biologia. Exemplos mais comuns são:

- Cromossomo e genoma: na biologia, genoma é o conjunto completo de genes de um organismo. O genoma pode ter vários cromossomos. Nos AGs, ambos representam a estrutura de um dado que codifica uma solução para um problema, um simples ponto no espaço.
- Gene: na biologia, é a unidade de hereditariedade que é transmitida pelo cromossomo e que controla as características do organismo. Nos AGs, é um parâmetro codificado no cromossomo.
- Indivíduo: um simples membro da população. Nos AGs, um indivíduo é formado pelo cromossomo e sua aptidão.
- Alelo: na biologia, representa uma das formas alternativas de um gene. Nos AGs, representa os valores que o gene pode assumir. Por exemplo, um gene pode representar o parâmetro de uma cor, e seu alelo poderia ser cinza, amarelo, roxo.

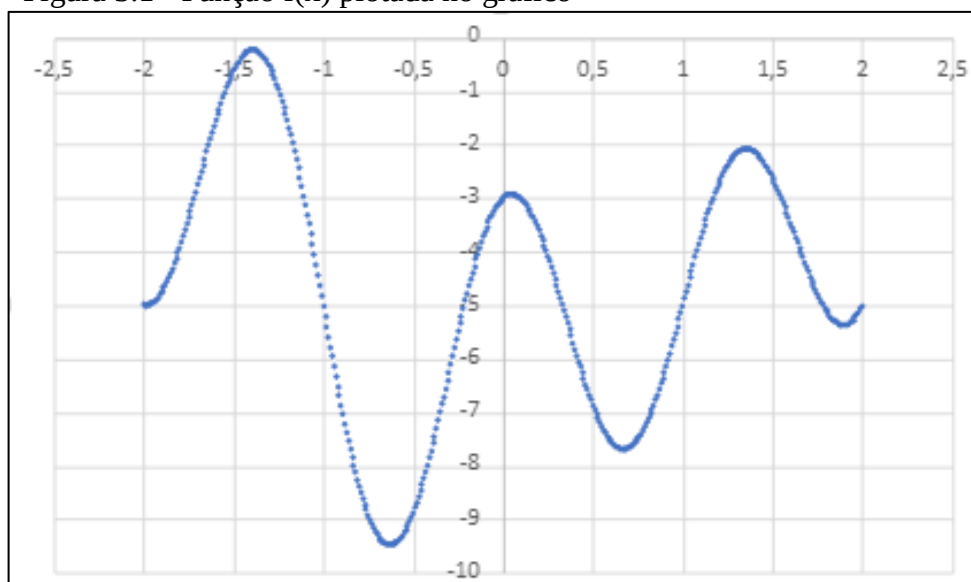
3.3 Estrutura dos Algoritmos Genéticos

Para começar a entender melhor a questão do algoritmo genético, é de grande valia demonstrá-lo no exemplo prático. Para efeito de aprendizado, seja considerado a função a seguir e a busca para encontrar o ponto mínimo da mesma:

$$f(x) = x^2 \text{Sen}(\pi X) + 3\text{Cos}(1,5\pi X) - 6, -2,00 \leq X \leq 2,00 \quad (3.1)$$

Ao plotar um gráfico dessa função com a variável x variando entre -2,00 até +2,00, obtém-se o seguinte resultado na Figura 3.1:

Figura 3.1 - Função f(x) plotada no gráfico

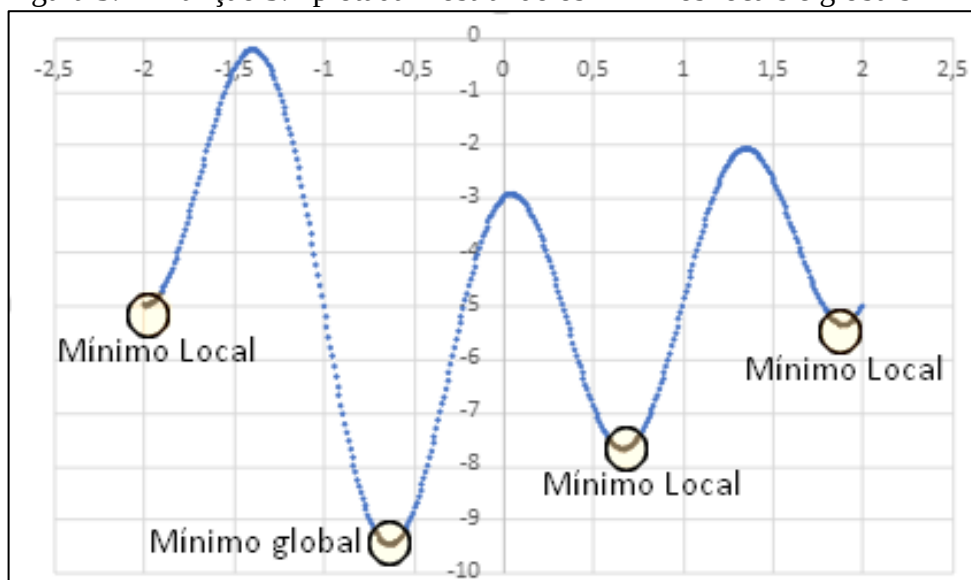


Fonte: Elaborado pelo autor

Observando rapidamente o gráfico, é possível notar que ele contém vários pontos de inflexão, porém é notório quais são os pontos que apresentam os mínimos valores locais, e entre esses valores locais existe um que é o de mínimo valor global. O nome mínimo local se dá devido ao mesmo atingir valores menores que o de seus vizinhos. O mínimo global é exatamente por ser o menor entre todos. Neste problema, o mínimo global encontra-se no ponto cujo valor de x é igual a -0,63, e o valor da função nesse ponto assume o valor de -9,48. Desde já é necessário ter noção de que uma grande quantidade de técnicas de otimização não é capaz de localizar o ponto de mínimo global de uma função com múltiplos pontos de mínimo,

felizmente em nosso exemplo o espaço é bem limitado, o que é comum dentro da engenharia ter-se um limite estabelecido no qual vai se trabalhar. No caso da hidráulica predial, utilizando o diâmetro como exemplo, dificilmente se encontrará uma tubulação com diâmetro maior que 150 mm em uma obra residencial. No algoritmo genético, cria-se uma função chamada função objetivo da qual para cada um dos valores obtidos nessa função receberá uma nota para avaliação do que chamaremos de função aptidão e a partir daí encontrar a solução ótima. Na Figura 3.2, a função 3.1 sendo demarcado os mínimos locais e globais.

Figura 3.2 - Função 3.1 plotada mostrando os mínimos locais e globais



Fonte: Elaborado pelo autor

Acontece que inicialmente não se tem nenhuma informação de aptidão do algoritmo genético, e é por isso que aqui se dá o pontapé inicial, a geração de uma população inicial, como falado anteriormente: a geração de possíveis soluções para os problemas.

Essa população inicial é formada por um conjunto aleatório de cromossomos que representam possíveis soluções do problema a ser resolvido. Durante o processo evolutivo - podendo sofrer crossover e mutação -, a população é avaliada e cada um desses cromossomos recebe uma nota de aptidão, que reflete a qualidade da solução que ele representa. Seguindo o darwinismo, os cromossomos mais aptos são selecionados e os menos aptos são descartados. Esse processo é repetido inúmeras vezes até que uma solução seja satisfatória ou que a maioria dos cromossomos convirjam para ela.

Da terminologia biológica, cada cromossomo é uma estrutura de dados que representa uma possível solução do problema que se busca otimizar. Em geral, representa um conjunto de parâmetros da função objetivo cuja resposta será maximizada ou minimizada. Se o

cromossomo representa N parâmetros de uma função, então o espaço de busca é um espaço com N dimensões.

3.4 A representação binária dos parâmetros

O algoritmo genético abordado nesse texto terá duas representações: a binária e a real. Para a população inicial, torna-se necessário representar o único parâmetro que a função tem: a variável X , mas em formato de cromossomo.

Seja criado um cromossomo S_1 para representar o primeiro indivíduo da possível solução do problema na população inicial. Esse cromossomo terá uma cadeia escolhida por 5 bits, mas poderia assumir uma cadeia maior ou menor. Quanto maior a cadeia, maior a precisão numérica da solução. Gerando-se de forma aleatória, o cromossomo S_1 assumirá a forma:

$$S_1 = 10110$$

Por ser uma representação binária, o seu sistema só assume esses genes: 1 e 0. Decodificando esse cromossomo e convertendo o mesmo da base 2 para a base 10, ele corresponderá a:

$$B_{10} = 0x(2^0) + 1x(2^1) + 1x(2^2) + 0x(2^3) + 1x(2^4) = 22$$

Caso o leitor não esteja familiarizado na decodificação, o processo consiste em ler o cromossomo de trás para frente multiplicando seu valor, 1 ou 0, por (2^{n-1}) , onde n é a ordem do gene de trás para frente. Como o primeiro número de trás para frente é o gene 0, ele foi multiplicado por (2^{1-1}) . O segundo gene é o 1, ele é multiplicado por (2^{2-1}) , que resulta em 2. Terceiro gene é 1 também, multiplica-se por (2^{3-1}) , resultando em 4. Faz-se assim para toda a cadeia. No final, somam-se todos os valores.

É importante notar o fato de que o cromossomo decodificado é um número que estará no intervalo $[0, 2^{L-1}]$, em que L é o tamanho da cadeia de bits. No caso desse exemplo, L é igual a 5 (cinco), e seu intervalo está entre 0 (zero) e 31 (trinta e um).

Obtido seu valor decodificado, agora será necessário mapeá-lo no intervalo que foi dado no problema. Como a função que está sendo apresentada tem intervalo entre -2,00 e 2,00, o valor de x correspondente do cromossomo pode ser encontrado através da fórmula:

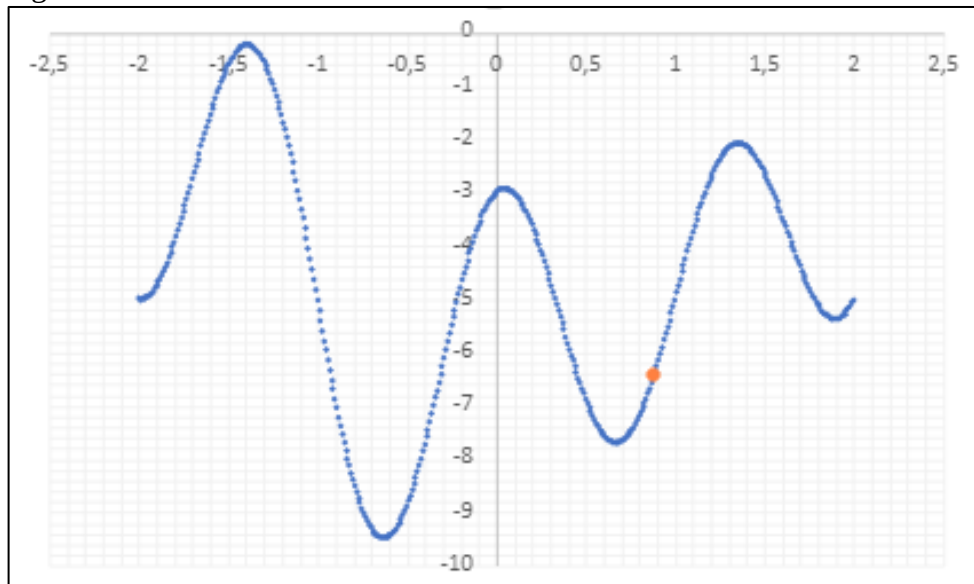
$$X = \min + (\max - \min) \frac{B_{10}}{2^L - 1} \quad (3.2)$$

Substituindo seus respectivos valores:

$$X = -2,00 + (2,00 - (-2,00)) \frac{22}{31} \quad (3.3)$$

Com isso, obtém-se o resultado $X = 0,84$. Caso o problema apresentasse duas variáveis, sendo necessário encontrar um valor X e um valor Y , os seus parâmetros seriam representados na mesma cadeia de bit, porém cada um ocupando uma parte da cadeia, como vizinhos. Na Figura 3.3, o gráfico da função está demarcado pelo valor encontrado no cromossomo S_1 , cuja variável na base decimal é 0,84, tendo assim encontrado na função 3.1 o valor igual a -6,97.

Figura 3.3 - Valor de x encontrado no cromossomo s1



Fonte: Elaborado pelo autor

Após demonstração do cromossomo S_1 , é necessário lembrar que o AG começa com uma população inicial, gerada aleatoriamente, e não apenas um indivíduo. Essa população pode conter 10, 20, 30... 100 cromossomos, e com isso 100 (cem) possíveis soluções.

No presente texto, não será demonstrado uma tabela com a geração dos N primeiros cromossomos, mas o entendimento de como funciona. Supondo que a população inicial é de 30 cromossomos - S_1 a S_{30} -, cria-se uma tabela com ordem decrescente do valor da função

objetivo, juntamente com o valor de X codificado no cromossomo, o valor objetivo e a aptidão para esse valor. No caso da população inicial, como não há conhecimento prévio sobre o espaço e busca, reforça-se a ideia de serem criados aleatoriamente.

O principal campo de aplicação dos AGs é em problemas complexos, com múltiplos mínimos/máximos. Entre suas vantagens, funcionam tanto em parâmetros contínuos e discretos. Não é necessário conhecimento matemático aprofundado do problema considerado.

3.5 Seleção

Inspirado no Darwinismo, o AG seleciona os melhores cromossomos iniciais, por isso que são colocados também em ordem decrescente na tabela. Os cromossomos de alta aptidão, chamados de cromossomos pais, através dos operadores de crossover e mutação, irão gerar os cromossomos filhos. Uma população intermediária é utilizada para alocar os cromossomos pais selecionados. Os pais são selecionados com a probabilidade proporcional a sua aptidão.

Várias alternativas são propostas para definir a aptidão. As simples igualam essa ao valor da função objetivo, desde que não assumam valores negativos. Outra alternativa para definição da aptidão é pelo ordenamento do cromossomo na população. O primeiro cromossomo recebe uma aptidão arbitrária e o último o valor 0 (zero). Interpolam-se os dois extremos por uma reta encontrando uma função que se encaixe de acordo com o tamanho da população.

3.6 Crossover e mutação na representação binária

Finalmente chegando a um assunto já tocado, mas ainda não explanado: crossover e mutação. Esses dois operadores são os principais mecanismos de busca dos AGs para explorar as regiões até então desconhecidas no espaço de busca.

Começando pelo crossover, levando para o lado da biologia, da genética, o efeito crossover acontece na prática como na Figura 3.4. Dois cromossomos "se encontram", permutam entre si, e ocorre o efeito crossover: parte de um é trocada igualmente com a parte de outro.

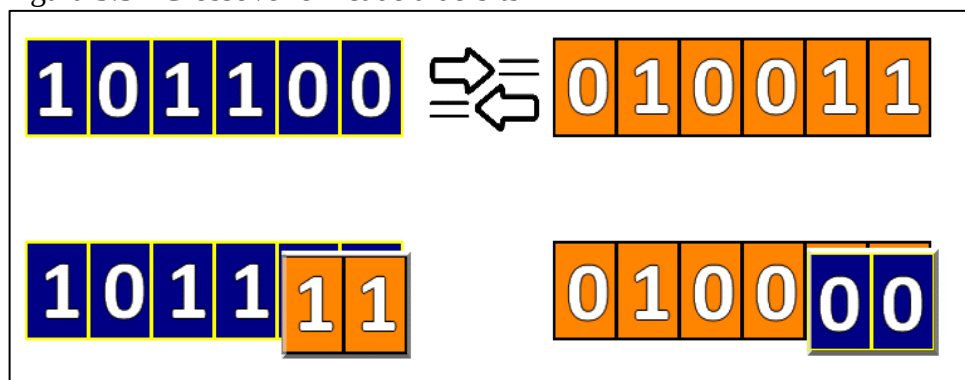
Figura 3.4 - Crossover entre cromossomos



Fonte: Elaborado pelo autor

Trazendo para o algoritmo genético, cada cromossomo é uma cadeia de bits. Eles se encontrarão também, no caso os cromossomos pais, que são retirados da população intermediária, permutarão entre si, gerarão dois cromossomos filhos. Observe na Figura 3.5 que se os cromossomos forem inteiramente iguais ou apenas a parte que será permutada, os cromossomos filhos serão iguais aos cromossomos pais.

Figura 3.5 - Crossover em cadeia de bits



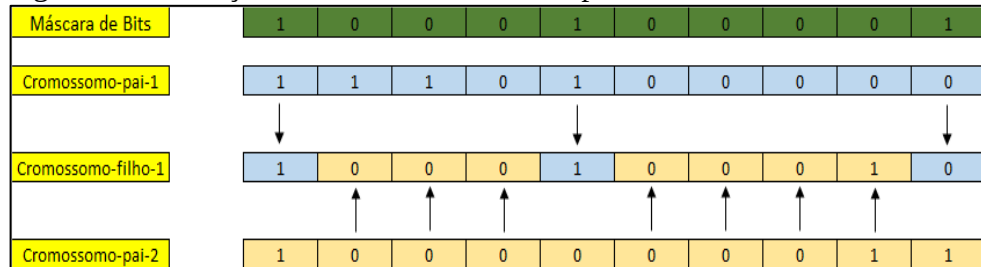
Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 3.5, cada cromossomo copiado foi "dividido" em duas partes, uma contendo 4 bits e outra contendo 2 bits. Porém existem inúmeros tipos de crossover, que podem permutar um bit sim, um bit não, como exemplo. Eles poderiam permutar os três bits iniciais. Apenas os bits das extremidades. O algoritmo genético permite fazer esse tipo de escolha e no início do desenvolvimento é selecionado a taxa de probabilidade de cruzamento de cada par de cromossomos. Mas nunca eles poderão terminar com uma cadeia menor ou maior do que a inicial.

Os operadores de crossover mais utilizados são o uniforme e o de N pontos. O Crossover Uniforme acontece da seguinte maneira: para cada par de pais, uma máscara de bits aleatórios é criada. Se o primeiro bit da máscara possui o valor 1, então o primeiro bit do

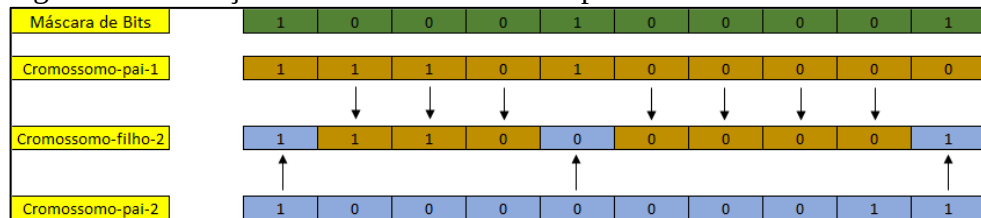
cromosso-pai-1 é copiado para o primeiro bit do cromossomo-filho-1. Se ocorrer o contrário, de o primeiro bit da máscara possuir o valor 0, então o primeiro bit do cromossomo-pai-2 que é copiado para o primeiro bit do cromossomo-filho-1. Na geração do cromossomo-filho-2, o procedimento é invertido: se o bit da máscara é 1, então será copiado o bit do cromossomo-pai-2. A Figura 3.6 e Figura 3.7 ilustram como ocorre o processo.

Figura 3.6 - Geração de cromossomo filho 1 por crossover uniforme.



Fonte: Elaborado pelo autor

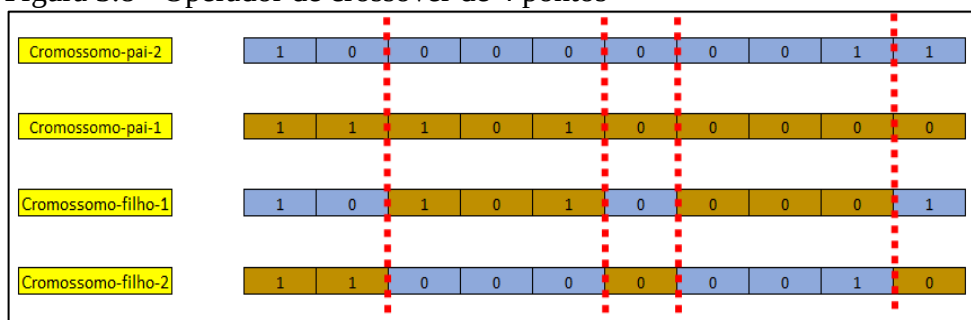
Figura 3.7 - Geração de cromossomo filho 2 por crossover uniforme



Fonte: Elaborado pelo autor

É importante lembrar que os dois cromossomos filhos não ficaram com seus genes como se fossem opostos. O operador de crossover de N pontos é mais fácil de entender. O operador de 1 (um) ponto é o que foi visto anteriormente: escolhe-se um ponto específico da cadeia, que dividirá a mesma em duas e faz-se a permutação com o outro cromossomo. No operador de 2 (dois) pontos, os dois pontos de corte são escolhidos aleatoriamente e as seções entre os dois pontos são trocados entre os pais. Assim se segue. Na Figura 3.8 um exemplo de crossover de 4 pontos.

Figura 3.8 - Operador de crossover de 4 pontos



Fonte: Elaborado pelo autor

O crossover de N pontos mais usado tem sido o de 2 pontos. Após o processo de crossover, entra a vez do operador de mutação. Tendo sido criada uma população, tendo separado os melhores, tendo sofrido crossover um número de cromossomos, o operador de mutação inverterá o valor de alguns bits. Se um bit é 1 (um) passará a ser 0 (zero). Se é 0 (zero) passará a ser 1 (um). A figura abaixo mostra um exemplo de que o primeiro filho do crossover anterior tenha 1 (um) bit alterado enquanto o segundo filho tenha 2 (dois). Ambos cromossomos filhos são os da Figura 3.5.

Figura 3.9 - Mutação em duas cadeias de 6 bits



Fonte: Elaborado pelo autor

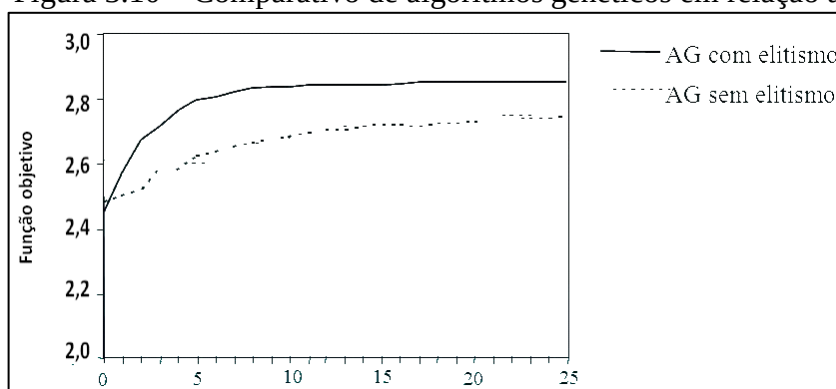
Quando levado para a prática, esse exemplo foi didático, mas não se pode dizer que foi dos melhores porque não foi dado o tamanho da população. Se for uma população pequena e que tem uma taxa de mutação tão alta assim, a diversidade seria garantida, mas destruiria a informação contida no cromossomo. Segundo Lacerda e Carvalho (1999), a taxa de mutação deve ser normalmente entre 0,1% e 5%, pequena, mas que ainda assim garantirá a diversidade. Essa porcentagem representa a quantidade bits em toda a população que sofrerão mutação.

Definida a primeira população, o procedimento se repetirá por um dado número de gerações. Caso se saiba a resposta máxima ou mínima da função objetivo, esse valor pode ser utilizado como critério de parada do algoritmo genético. Caso não, pode-se repetir por um número que se acredite ser suficiente para encontrar ou observar se 95% dos cromossomos convergiram para um mesmo valor.

3.7 Elitismo

Aqui entra um termo que até então não havia sido comentado: o elitismo. As operações de crossover e mutação podem perder o melhor cromossomo de uma geração para a outra, então é fundamental transferir os melhores cromossomos de uma geração para a próxima sem sofrerem alterações. À essa transferência chama-se de elitismo, proposto por DeJong (1975), um dos trabalhos pioneiros sobre AGs. A Figura 3.10 abaixo mostra um exemplo de um algoritmo genético executado 100 (cem) vezes com elitismo e sem elitismo, e a conclusão que se chega é que aqueles algoritmos que utilizaram o elitismo convergiram mais rápido para encontrar a solução.

Figura 3.10 – Comparativo de algoritmos genéticos em relação ao elitismo



Fonte: Lacerda e Carvalho, 1999.

3.8 O Algoritmo genético e sua representação real

Além do algoritmo genético na representação binária, há outra representação que também é muito utilizada: a representação real. A representação binária é historicamente importante, visto que foi utilizada nos trabalhos pioneiros de Holland (1975), sendo tradicional, fácil de utilizar e manipular, além da simplicidade de analisar teoricamente. Contudo, para parâmetros contínuos, de boa precisão numérica, é necessário armazenar cromossomos longos na memória.

Em casos com muitos parâmetros, as cadeias de bits se alongam e convergem vagarosamente. A própria mutação em bits primários pode afetar mais a aptidão que a mutação dos bits do gene. Na representação real, cromossomos menores são gerados e são compreendidos mais naturalmente do que a cadeia de bits. Uma grande vantagem da representação real é que ela tem maior facilidade de criar novos operadores.

3.9 Crossover e mutação em algoritmo genético na representação real

Na representação binária, os operadores convencionais - crossover de N pontos e uniforme - funcionam bem, porém na representação real eles basicamente trocam os valores dos genes e com isso não criam novas informações, novos números reais. Para a representação real, será melhor utilizar operadores aritméticos, tais como os citados Lacerda e Carvalho (1999): crossover média, crossover média geométrica, crossover BLX- α , crossover aritmético, crossover heurístico. Os operadores aritméticos realizam combinações lineares entre os cromossomos pais.

Considerando dois cromossomos pais, P1 e P2, tais que seu ponto flutuante seja representado por:

$$P_1 = (30,173; 85,342)$$

$$P_2 = (75,989; 10,162).$$

Utilizando o Crossover média (DAVIS, 1991), o cromossomo C é gerado da seguinte forma:

$$C = \frac{(P_1 + P_2)}{2} \quad (3.4)$$

Sabendo os valores dos cromossomos pais, tem-se:

$$C = \left(\frac{(30,173 + 75,989)}{2}; \frac{(85,342 + 10,162)}{2} \right)$$

$$C = (53,081; 47,752)$$

Uma variação partindo deste crossover é o crossover média geométrica, do qual cada gene do cromossomo C seria dado por:

$$C = \sqrt{P_{1i}P_{2i}}, \text{ para } i=1, 2, \dots, i. \quad (3.5)$$

Utilizando os cromossomos pais, tem-se:

$$C = (\sqrt{(30,173) \times (85,342)} ; \sqrt{(75,989) \times (10,162)})$$

$$C = (47,883; 29,449)$$

Observando os genes dos cromossomos gerados, eles estão sempre indo para o meio de um intervalo cujos extremos são os cromossomos pais, causando perda de diversidade. Uma melhora desses genes pode ser através do crossover BLX- α .

O crossover BLX- α - também chamado de crossover mistura, do inglês Blend crossover - é produzido da seguinte forma:

$$C = P_1 + \beta(P_2 - P_1) \quad (3.6)$$

A variável β pertence a uma distribuição uniforme no intervalo $[-\alpha, \alpha+1]$. Se α for igual a 0, os filhos situam-se sobre o intervalo I entre os dois pontos que representam os pais. O parâmetro α estende o intervalo I. Se $\alpha = 0,5$; o intervalo I é extendido αI em ambos os lados. Esse é o operador mais utilizado para a representação real.

Utilizando novamente os cromossomos P_1 e P_2 , tal que $\alpha = 0,5$ e $\beta = 1,262$ - esse valor encontra-se no intervalo $(-0,5; 1,5)$ -, obtém-se os seguintes cromossomos:

$$C_1 = 30,173 + 1,262(75,989 - 30,173) = 87,993$$

$$C_2 = 85,342 + 1,262(10,162 - 85,342) = -9,535$$

$$C = (87,993; -9,535)$$

Caso o valor do novo gene seja infactível - o gene não satisfaz a uma restrição pré-estabelecida -, um novo filho será gerado com novo β . Repete-se o processo até obter um filho factível. Uma alternativa para o blend crossover é Crossover linear. Tomando os pais P_1 e P_2 , o crossover linear obtém três filhos, C1, C2 e C3:

$$C_1 = 0,5P_1 + 0,5P_2 \quad (3.7)$$

$$C_2 = 1,5P_1 - 0,5P_2 \quad (3.8)$$

$$C_3 = -0,5P_1 + 1,5P_2 \quad (3.9)$$

Desses três cromossomos filhos, apenas o melhor é escolhido, os demais são descartados. Michalewicz (1994) criou outros operadores para a representação real, tal como o crossover aritmético, simples e heurístico. Adewuya (1996) criou o crossover quadrático. Gen e Cheng (1997), operadores combinados com técnicas que levam em consideração a direção aproximada do gradiente. Na literatura existem inúmeros outros tipos de operadores que aumentam o campo de estudo dos algoritmos genéticos em representação real.

No algoritmo genético de representação real, também existem algumas mutações: a mutação uniforme é a simples substituição de um gene por um número aleatório. A mutação gaussiana é a substituição de um gene por um número aleatório de uma distribuição normal. Na mutação creep, um pequeno número aleatório obtido de uma distribuição normal é adicionado ao gene. Na literatura é possível encontrar outras mutações como a mutação limite, mutação não-uniforme, mutação não-uniforme múltipla.

4 MODELO HIDRÁULICO

4.1 Introdução

Abordado no capítulo 2 desse texto, o projeto hidráulico deve ser muito bem elaborado para proteger os consumidores contra quaisquer riscos à saúde. E, embora as redes de distribuição existam há anos, as condições transientes ainda não são detalhadamente consideradas. A origem disso é que antigamente as redes de distribuição de água eram mais simples, o reservatório e as caixas d'água alimentavam os consumidores pela ação da gravidade, e as condições eram quase-permanentes. Os tubos da rede eram de diâmetro pequeno, assim como as pressões existentes eram baixas.

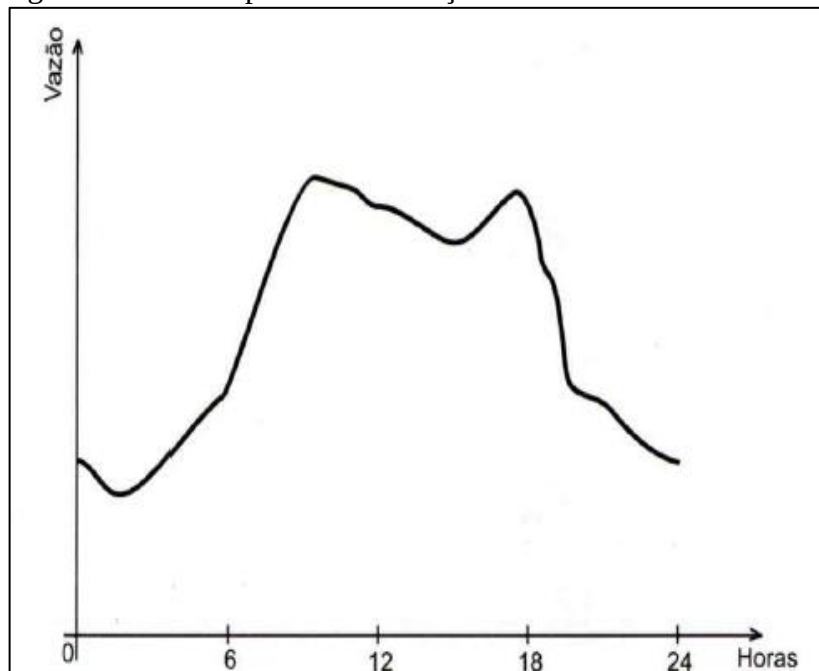
O fenômeno transiente é de grande importância e está presente no dia a dia de uma rede de distribuição. Segundo Araújo (2003), o transitório hidráulico é definido como a situação de fluxo não permanente quando o fluxo varia de um estado permanente para outra situação de estado permanente. Os casos mais comuns de transientes em redes são as mudanças de ajustes de válvulas – acidental ou planejada -, a variação nas demandas ou consumos, partida ou parada de bombas – uma simples queda de energia já causaria a parada da bomba – e alteração do nível d'água de um reservatório.

Quando as condições de fluxo são alteradas lentamente, as variações nas pressões são pequenas. Entretanto, se antigamente a rede era abastecida principalmente pela gravidade,

hoje o sistema é composto de paradas e partidas de bombas e manobras de válvulas. Os distúrbios no fluxo são comuns, e esses podem gerar ondas de alta pressão que conduzem informações para todo o sistema hidráulico.

Gomes (2009) conseguiu desenhar a curva padrão da variação do consumo médio diário de uma rede em cidade brasileira, a mesma é visualizada na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Curva padrão da variação do consumo médio diário



Fonte: Gomes (2009).

Embora sem uma escala de valores no eixo da vazão da Figura 4.1, é perceptível que durante a madrugada o consumo é menor, mas nunca zerado, pois existem os estabelecimentos que funcionam nesse período. Uma alteração brusca da vazão nesse período pode estar fortemente relacionada a vazamentos na rede.

Para analisar um sistema dinâmico, tal como sistema mecânico, elétrico ou hidráulico, é preciso obter um modelo que represente a descrição matemática das características dele. Nesses sistemas, as equações diferenciais são normalmente utilizadas. Porém nem sempre as equações diferenciais são o suficiente para obter uma dada resposta do sistema, e aí se utiliza um modelo numérico para poder fazer essas análises. Um modelo e equações diferenciais parciais.

O fluxo transiente em um conduto forçado é governado por equações diferenciais parciais não lineares. A equação 4.1 é referente a conservação da massa. A equação 4.2 é referente a conservação do momento.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\alpha^2}{gA} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ|Q|}{2DA} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (4.2)$$

A vazão é representada por Q [$M^0L^3T^{-1}$]. A carga piezométrica por H [$M^0L^1T^0$]. A gravidade por g [$M^0L^1T^{-2}$]. Fator de atrito de Darcy-Weisbach por f [$M^0L^0T^0$]. Tempo por t [$M^0L^0T^1$]. Área da seção transversal por A [$M^0L^2T^0$]. A distância por x [$M^0L^1T^1$]. A celeridade por α [$M^0L^1T^{-1}$]. O diâmetro interno da tubulação por D [$M^0L^1T^0$].

Esse conjunto de equações não tem uma solução analítica simples no geral, então o método numérico será um recurso para a solução. Anterior a aplicação do método numérico, as equações serão transformadas em equações ordinárias para poder obter resolução.

Além dos motivos já expostos para não terem dado tanta atenção ao estudo de transientes no passado, a complexidade da resolução se torna também um obstáculo a ser superado, porém, como benefício, a análise incorpora uma melhoria no modelo, uma operação economicamente mais viável e possivelmente um custo de operação mais baixo.

Segundo Araújo (2003), os modelos aplicados em redes, tanto no regime permanente como não permanente, são encarados sob dois tipos de análise: o problema direto e o problema inverso. No problema direto, o comportamento hidráulico do sistema (isto é, a vazão em cada tubo, a pressão em cada nó, as cargas hidráulicas e vazões nas bombas) é determinado pelas características do sistema, em como pelas condições de operação e variação da demanda. No problema inverso, os parâmetros do sistema são tratados como variáveis e são determinados estabelecendo-se especificações de vazão e/ou pressão. Os problemas inversos têm sido usados em diferentes tipos de aplicação de análise de redes, incluindo calibração e localização de vazamentos. Em geral, a resolução dos problemas é feita por meio de métodos diretos e indiretos. Os métodos inversos diretos buscam resolver diretamente o sistema de equações diferenciais considerando os parâmetros como variáveis dependentes. Por outro lado, os métodos inversos indiretos utilizam um processo iterativo em que os parâmetros variam e a simulação é repetida até conseguir-se reproduzir de forma satisfatória a resposta do sistema. Os métodos indiretos são os mais utilizados devido à simplicidade de sua formulação matemática e ao fato de serem menos sensíveis a erros nos dados de entrada.

A ligação entre um modelo hidráulico e uma técnica de otimização é uma maneira eficiente de se obter valores das variáveis de decisão com sucesso, minimizando ou maximizando uma função objetivo.

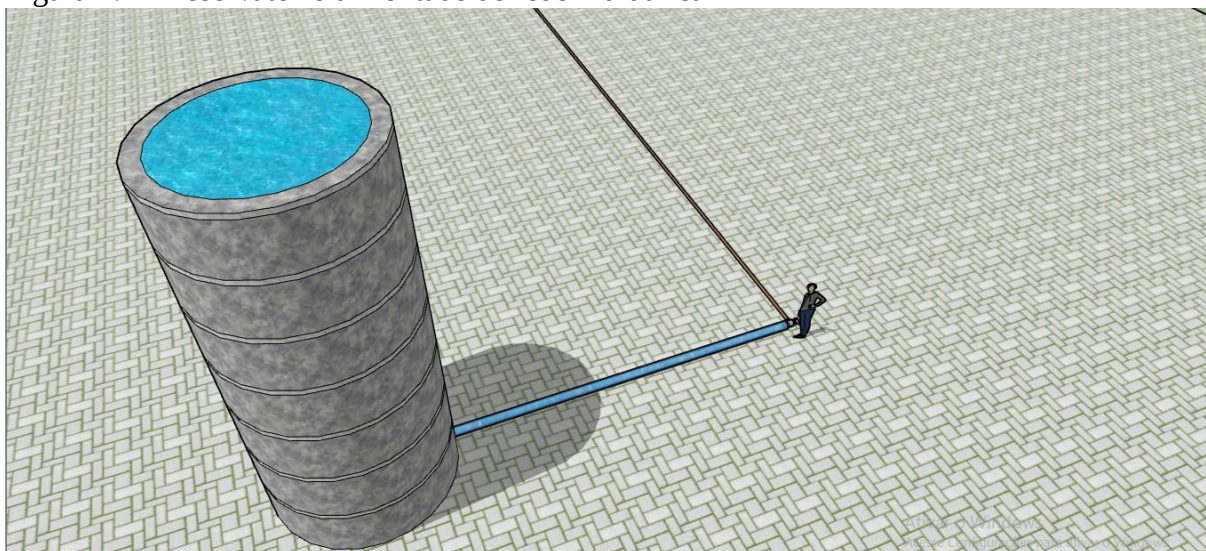
Há dois modelos hidráulicos para analisar os fenômenos transientes: os modelos rígidos e os modelos elásticos. No primeiro, os efeitos elásticos da água e da tubulação não são considerados. No segundo, esses efeitos são considerados. O primeiro é normalmente utilizado para explicar os fenômenos de oscilação de massa. O segundo, para análise do golpe de aríete.

No regime transiente, a água, que é ligeiramente compressível, pode produzir grandes variações de pressões a partir de um pequeno desequilíbrio de fluxo, possibilitando que uma quantidade notável de energia seja armazenada. Quando as mudanças do fluxo são graduais, de tal forma que o desequilíbrio de energia e massa na tubulação é pequeno, a utilização do modelo rígido é a melhor alternativa. Entretanto, em casos de rápidas mudanças, como válvulas e bombas, o modelo elástico se torna o mais apropriado, devido aos grandes pulsos de pressão, capazes de prejudicar as linhas de tubulações.

4.2 A celeridade

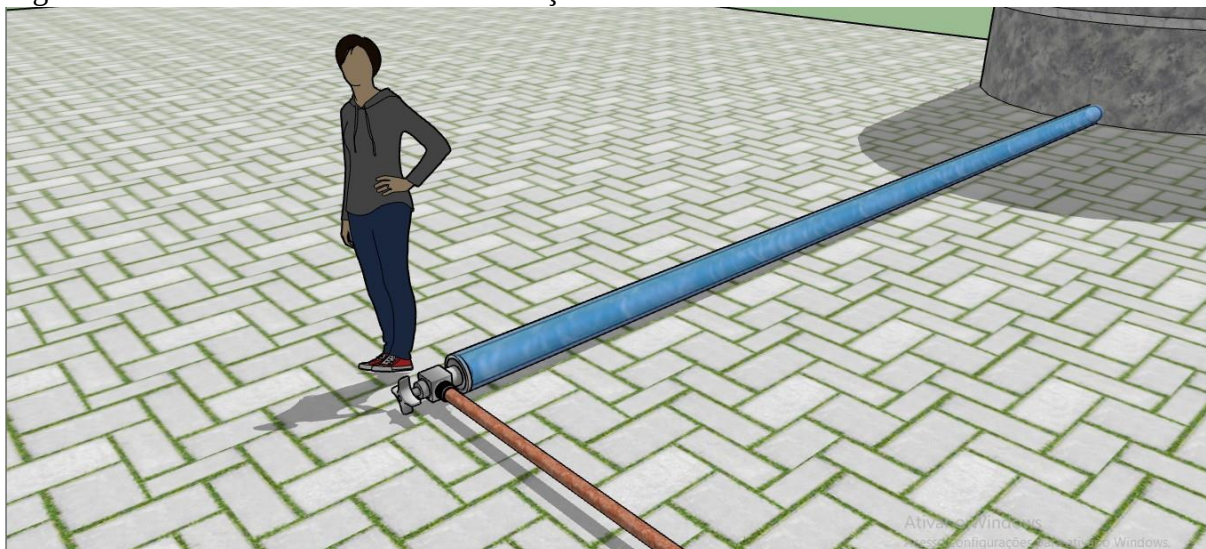
Considerando um reservatório a montante de uma tubulação, com velocidade de fluxo igual a V_0 [$M^0L^1T^{-1}$] na tubulação e uma válvula à X [$M^0L^1T^0$] metros do início da mesma, como na Figura 4.2e Figura 4.3.

Figura 4.2 - Reservatório a montante de rede hidráulica



Fonte: Elaborado pelo autor.

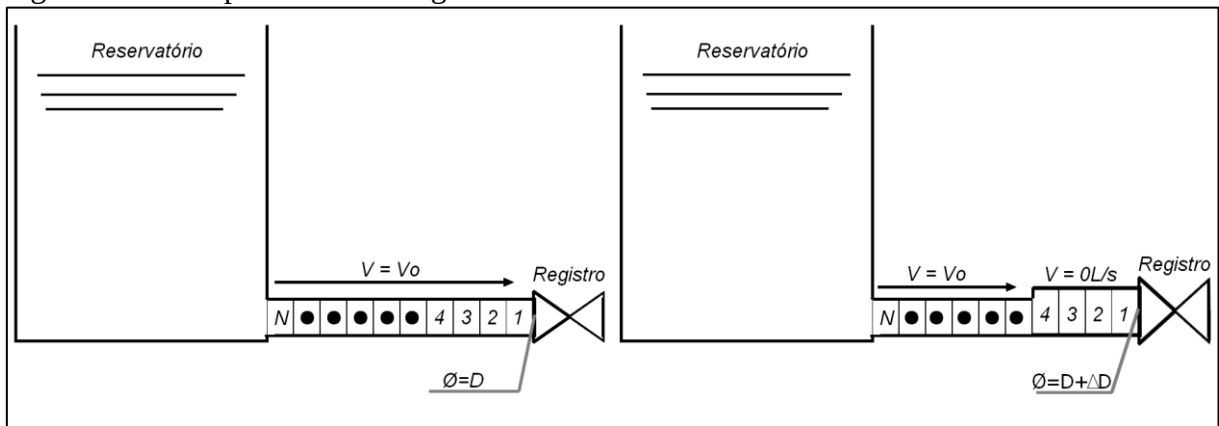
Figura 4.3 - Válvula ao fim de uma tubulação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando que essa tubulação seja dividida em N camadas para melhor entendimento do fenômeno transiente. As camadas serão numeradas em ordem crescente a partir da camada anterior à válvula até a N -ésima que é a saída do reservatório. Em um determinado instante t_o , alguém resolve fechar a válvula por completo de forma brusca, cessando toda a vazão de água. Ao fechar a válvula bruscamente, a água que estava na camada 1 irá se chocar com o registro e variará a sua velocidade de V_o para $V = 0 \text{ L/s}$ [$\text{M}^0\text{L}^1\text{T}^{-1}$]. Com a camada 1 tendo velocidade nula, a camada 2 que estava com velocidade V_o se choca na camada 1, também tem sua velocidade zerada. O impulso requerido para causar essa parada é obtido por uma elevação da pressão em ΔP [$\text{M}^1\text{L}^{-1}\text{T}^{-2}$], assim sucessivamente até chegar na camada N . Essas condições se propagam na forma de uma onda de aumento de pressão que viaja desde a válvula até a extremidade de montante do conduto fechado numa velocidade denominada velocidade da onda acústica, velocidade de propagação da onda ou celeridade, e é numericamente igual a velocidade do som no fluido. Essa onda transmite o impulso na forma de incremento de pressão suficiente para causar a parada completa do escoamento no conduto (VASCONCELOS, 2008). A Figura 4.4 ilustra o escoamento com a válvula aberta e o escoamento pouco depois do fechamento brusco.

Figura 4.4 - Comportamento da água em fechamento brusco de uma válvula

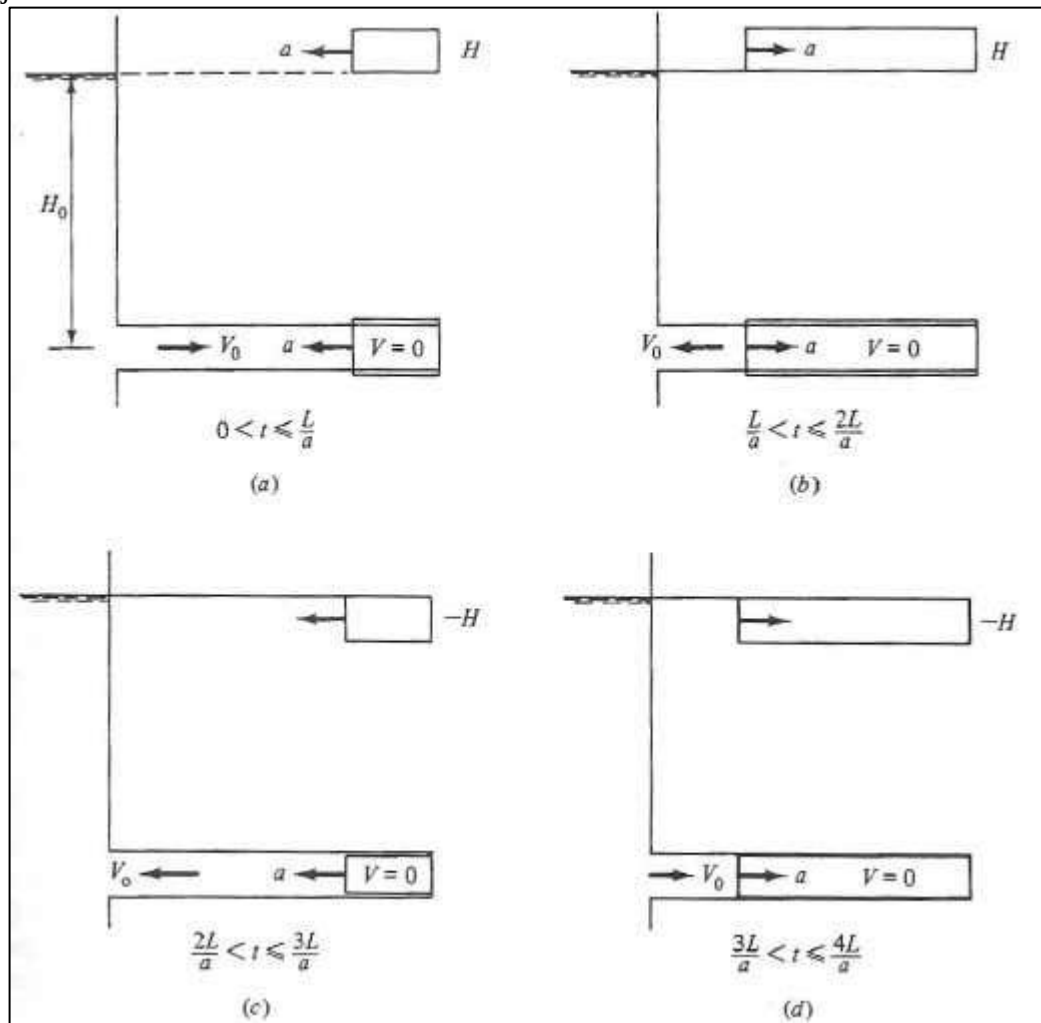


Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando todas as N camadas tiverem sofrido o acréscimo de pressão ΔP e tido sua velocidade zerada, o sentido do escoamento irá mudar no sentido contrário ao escoamento original, indo na direção do reservatório, criando o que se chama de onda de depressão. Porém no reservatório há uma inercia muito grande, não permitindo que a água volte ao reservatório. Com isso, a água ficará transitando entre a camada N até a camada 1, dissipando energia, até que se retorne ao regime permanente. O tempo de sobrepressão τ [$M^0L^0T^1$] da primeira lamina de água, onde $V=0m/s$, é calculado por $\tau = 2L/\alpha$.

Vasconcelos (2008) descreveu a condição em que não há dissipação de energia, tendo sido o atrito desprezado, tornando o problema de caráter cíclico, em quatro fases específicas. Sendo $t=0s$ o instante em que a válvula é fechada completamente, ele considerou a primeira fase dentro do intervalo $0 < t \leq L/\alpha$. A segunda fase dentro do intervalo $L/\alpha < t \leq 2L/\alpha$. A terceira fase dentro do intervalo $2L/\alpha < t \leq 3L/\alpha$. A quarta fase do ciclo está no intervalo $3L/\alpha < t \leq 4L/\alpha$. Na primeira fase, o fechamento instantâneo, zerando a vazão, gera uma onda que causa um aumento da pressão em $H = \alpha/gV_0$ partindo da válvula até o reservatório. Na segunda fase, o fato de haver condições de carga constante impõe que, na extremidade ligada ao reservatório, a pressão permaneça com seu valor H_0 . Com a pressão no conduto em $(H + H_0)$, há um processo reverso de direção da vazão, como dito anteriormente, fazendo a vazão dá-se do conduto para o reservatório. Na terceira fase a frente de reversão da vazão chega à válvula, porém por estar fechada não é possível haver velocidade de escoamento. Então uma variação de pressão negativa age sobre o valor que vinha se propagando a partir do reservatório (H_0). Na última fase, o fato de a pressão no conduto ser menor que aquela no reservatório resulta numa admissão de vazão do reservatório para o conduto. Todas as quatro fases podem ser vistas na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Quatro fases de um problema de fechamento instantâneo de válvula a jusante de um conduto horizontal e sem atrito



Fonte: Vasconcelos (2008)

O valor da celeridade pode ser encontrado através da equação 4.3 apresentada por Halliwell e Chaudry (1987):

$$\alpha = \sqrt{\frac{k}{\rho(1 + \frac{K}{E}\Psi)}} \quad (4.3)$$

Da equação, E representa o módulo de elasticidade de Young [$M^1L^{-1}T^{-2}$]. K representa o módulo de elasticidade volumétrica do fluido [$M^0L^2T^{-1}$]. O ρ representa a massa específica do fluido [$M^1L^{-3}T^{-1}$]. O Ψ (psi) [$M^0L^0T^0$] representa um parâmetro que é função das características da tubulação – elasticidade, espessura da parede do tubo, ancoragem da

canalização e deformação – e do fluido – compressibilidade e presença de ar -, estando na Tabela 4.1 a faixa de valores da celeridade para diferentes tipos de materiais:

Tabela 4.1 - Valores típicos para a velocidade da celeridade em escoamentos de água pura

Material	Faixa de valores
Aço	1150 a 1250 m/s
Ferro fundido	1000 a 1100 m/s
PVC	350 a 380 m/s
PEAD	220 a 360 m/s
Fibro-cimento	900 a 950m/s

Fonte: Vasconcelos (2008)

Existem na literatura inúmeras expressões para o cálculo do parâmetro Ψ em diferentes condições de condutos. Para os condutos rígidos, $\Psi = 0$. Para os condutos elásticos, é possível encontrar na literatura algumas das expressões de Ψ de acordo com o Quadro 4.1:

Quadro 4.1 - Expressões de Ψ

Tipo do conduto elástico	Expressão de Ψ
Conduto de parede espessa	$\Psi = 2(1 + \nu) \frac{R_o^2 + R_1^2}{R_o^2 - R_1^2} - \frac{2\nu R^2}{R_o^2 - R_1^2}$
Conduto ancorado contra a movimentação longitudinal	$\Psi = \frac{2}{R_o^2 - R_1^2} [R_o^2 + 1,5R_1^2 + \nu(R_o^2 - 3R_1^2)]$
Conduto com juntas de dilatação	$\Psi = 2 \left(\frac{R_o^2 + R_1^2}{R_o^2 - R_1^2} + \nu \right)$
Conduto de parede fina, simplesmente apoiado com juntas de dilatação	$\Psi = \frac{D}{e}$
Conduto de parede fina, ancorado contra movimentação longitudinal	$\Psi = \frac{D}{e} (1 - \nu^2)$
Conduto de parede fina ancorada apenas na extremidade jusante.	$\Psi = \frac{D}{e} (1,25 - \nu)$

R_o e R_1 representam respectivamente os raios externos e internos da tubulação $[M^0L^1T^0]$. Sua diferença é igual a espessura da parede, e $[M^0L^1T^0]$. O termo ν $[M^0L^0T^0]$ representa a razão de Poisson, e D o diâmetro da tubulação $[M^0L^1T^0]$. Esses foram alguns dos exemplos que a literatura dá para o parâmetro Ψ . O presente trabalho no entanto irá trabalhar com uma expressão que não contém na tabela, e que foi utilizado por Araújo (2003) para conduto elásticos de paredes finas:

$$\Psi = \frac{D}{e}(1 - 0,5v) \quad (4.4)$$

4.3 Modelo da coluna elástica e o método das características

Para resolução de sistemas de equações diferenciais, como as equações 4.1 e 4.2, torna-se necessário ter um método numérico e ter as suas condições de contorno bem definidas. São inúmeros os métodos, porém em sua maioria são aproximados. A boa escolha dos intervalos de discretização e das condições de contorno podem ter soluções bem razoáveis. Vasconcelos (2008) define discretização como a abdicação de descrever o comportamento do problema em qualquer localização e/ou instante da simulação. O fenômeno transiente segue uma lei de propagação das ondas que associa o tempo t e a abscissa x definida ao longo de uma canalização, através da celeridade. O método das características se torna preferencial pela sua eficiência quando se considera que a celeridade é muito maior que a velocidade média do escoamento.

Araújo (2003) compilou as resoluções dos métodos em uma maneira mais prática reescrevendo as equações 4.1 e 4.2 da seguinte forma:

$$L_1 = gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} + \frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (4.5)$$

$$L_2 = a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (4.6)$$

Considerando a combinação linear das equações (4.5) e (4.6):

$$L = L_1 + \lambda L_2 = 0 \quad (4.7)$$

Obtém-se:

$$gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} + \frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + \lambda gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (4.8)$$

Reajustando os termos, a equação 4.8 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x}\right) + \lambda g A \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\lambda \partial x}\right) + \frac{f Q |Q|}{2DA} = 0 \quad (4.9)$$

Sendo $H = H(x, t)$ e $Q = Q(x, t)$ soluções das equações (4.5) e (4.6), as respectivas derivadas totais são escritas como:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (4.10)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (4.11)$$

Definindo o multiplicador λ como:

$$(\lambda a^2) = \left(\frac{1}{\lambda}\right) = \frac{dx}{dt} \quad (4.12)$$

e utilizando-se as equações (4.10), (4.11) e (4.12), chega-se às seguintes equações características:

$$C^+ = \frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0, \text{ para } \frac{dx}{dt} = +a \quad (4.13)$$

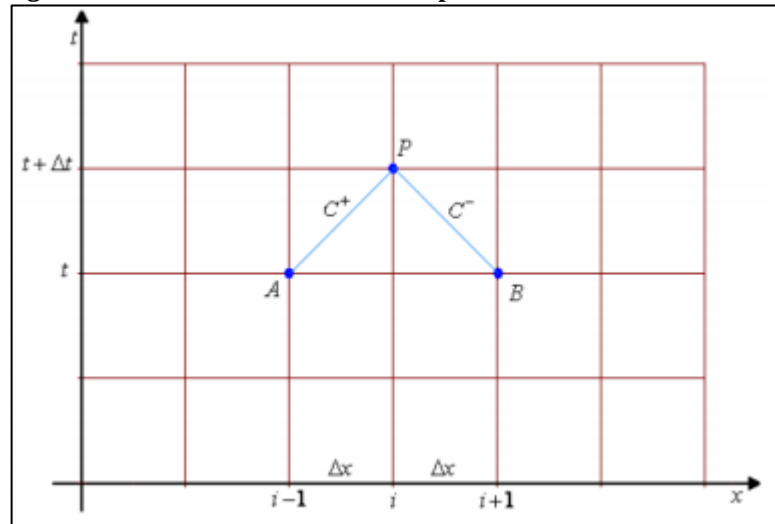
$$C^- = \frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0, \text{ para } \frac{dx}{dt} = -a \quad (4.14)$$

Sendo a equação (4.13) válida para $(dx/dt)=a$ e a equação (4.14) válida para $(dx/dt)=-a$, elimina-se a variável independente x e convertem-se as equações diferenciais parciais (4.5) e (4.6) em equações diferenciais ordinárias na variável independente t .

No plano x - t , essas relações representam duas linhas retas que tem inclinações $\pm 1/a$. Essas linhas recebem o nome de linhas características e, matematicamente, dividem o plano x - t em duas regiões, a qual pode ser dominada por dois diferentes tipos de soluções (WYLIE e STREETER, 1978). Segundo Araújo (2003), as linhas características no plano x - t representam o caminho da propagação das perturbações em vários pontos do sistema.

Observando a Figura 4.6, um distúrbio no ponto A no instante t_o alcançaria o ponto P depois de um intervalo de tempo Δt .

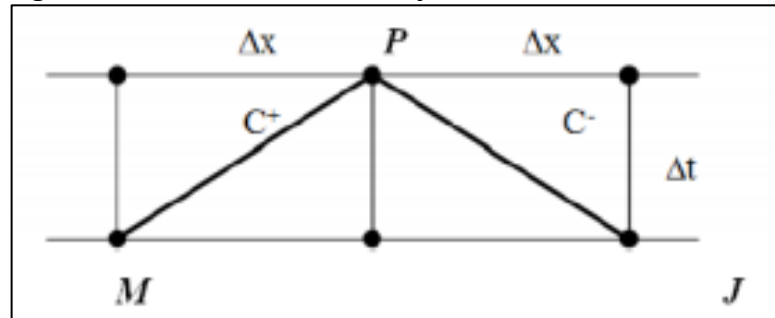
Figura 4.6 – Linhas características no plano x-t



Fonte: Rocha (2013)

Considerando a resolução numérica das equações (4.13) e (4.14), a discretização do domínio Δx e o tempo em intervalos Δt , a malha de discretização do método das características (MOC) é a observada na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Malha de discretização do MOC



Fonte: Araújo (2013).

Essa malha permite o cálculo da vazão e da carga no ponto P, no tempo $t + \Delta t$, a partir das cargas e vazões a montante (M) e jusante (J) no tempo t , calculadas por C^+ e C^- . As coordenadas de M, J e P são respectivamente (X_{i-1}, t_j) , (X_{i+1}, t_j) e (X_i, t_{j+1}) , em que t representa o tempo e i representa um ponto na malha discretizada. A equação (4.13) é utilizada para encontrar a relação entre o par de cargas H_P e H_M e o par de vazões Q_P e Q_M . Da mesma forma, a equação (4.14) é utilizada para encontrar a relação entre os pares de cargas H_P e H_J e as vazões Q_P e Q_J . Para isso, será necessário reescrever as equações (4.13) e (4.14) para a seguinte forma:

$$C^+ = dH + BdQ + RQ|Q|dt = 0, \text{ para } \frac{dx}{dt} = +a \quad (4.15)$$

$$C^- = -dH + BdQ - RQ|Q|dt = 0, \text{ para } \frac{dx}{dt} = -a \quad (4.16)$$

$$B = \frac{a}{gA} \quad (4.17)$$

$$R = \frac{fa}{2gDA^2} \quad (4.18)$$

Integrando as equações (4.15) e (4.16) ao longo de MP e JP (figura 4.6):

$$C^+ = \int_M^P dH + B \int_M^P dQ + R \int_M^P Q|Q|dt = 0 \quad (4.19)$$

$$C^- = - \int_J^P dH + B \int_J^P dQ + R \int_J^P Q|Q|dt = 0 \quad (4.20)$$

Os dois primeiros termos da equação (4.19) e (4.20) podem ser facilmente avaliados, porém o último termo representa as perdas de atrito, e são dificilmente avaliadas, posto que a vazão Q com o tempo t não é conhecida explicitamente. Wylie e Streeter (1978) propõe uma técnica de 1ª ordem, suficientemente viável e precisa, na qual as equações (4.19) e (4.20) podem ser reescritas como:

$$C^+ = H_P - H_M + B(Q_P - Q_M) + R\Delta t Q_M |Q_M| = 0 \quad (4.21)$$

$$C^- = -H_P + H_J + B(Q_P - Q_J) + R\Delta t Q_J |Q_J| = 0 \quad (4.22)$$

O último termo referente a perda de atrito teve uma aproximação para esse novo terceiro termo em cada uma das equações (4.21) e (4.22). Segundo Araújo (2003), esse método é conhecido como explícito e produz usualmente resultados satisfatórios em aplicações na engenharia. Entretanto, se o termo do atrito tornar-se muito grande, a aproximação de primeira ordem pode produzir resultados instáveis. Para tais casos, um método previsor-corretor ou uma aproximação de segunda ordem deve ser usada para evitar instabilidade.

Caso o fluxo transiente não flutue muito distante do estado permanente por um longo período de tempo, a teoria desenvolvida será válida.

4.4 Condições de contorno

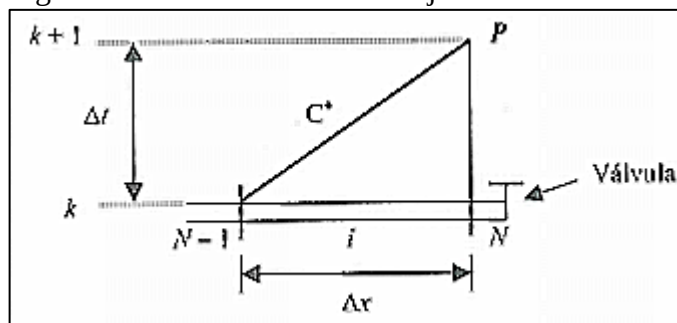
Segundo Lessa (1984), Santos (2000) e Barbosa (2006), as equações características são válidas apenas nas seções internas do conduto, para as seções de montante e jusante do tubo, apenas uma equação característica pode ser utilizada. Com isso, pelo menos uma equação relacionando a carga H e/ou a vazão Q com o tempo deve ser fornecida para a solução do problema. Essas equações - denominadas condições de contorno - são constituídas por qualquer acessório na linha de adução ou junção de trechos de tubos com características físicas distintas.

O método das características providencia um meio sistemático de cálculo das condições transientes em uma tubulação. Cada trecho é dividido em $N-1$ segmentos de comprimento Δx com N seções. No início de cada trecho (primeira seção) e ao término do trecho (última seção) uma equação de contorno e uma equação característica são necessárias. Nos nós interiores ($1 < i < N$), ambas as equações características são empregadas. Aplicando este esquema de discretização, obtêm-se equações para as diversas seções de uma rede hidráulica (ARAÚJO, 2003).

Araújo (2003) explicita as condições de contorno para: uma seção interna, para um reservatório de nível constante a montante, para um reservatório com nível constante a jusante, para nó de consumo ou demanda, para válvula a jusante. Como nesse presente trabalho o foco está em nós com demanda que são válvulas a jusante da tubulação, as cargas e vazões calculadas serão exemplificadas aqui.

Considerando inicialmente uma válvula localizada a jusante de uma tubulação genérica i (Figura 4.8):

Figura 4.8- Válvula localizada a jusante de uma tubulação



Fonte: Araújo (2003).

A equação de vazão para esse caso é encontrada pela equação (4.23) com explanação na (4.24) e (4.25):

$$Q_{i,N}(K+1) = 0,5(-C_v + \sqrt{C_v^2 + 4C_{p_1} + C_v}) \quad (4.23)$$

$$C_v = (\tau Q_{o_{i,N}})^2 \frac{B_i}{H_{o_{i,N}}} \quad (4.24)$$

$$C_{p_i} = \frac{H_{i,N-1}(K)}{B_i} + Q_{i,N-1} - \frac{R_i}{B_i} \Delta t Q_{i,N-1}(k) |Q_{i,N-1}(k)| \quad (4.25)$$

O parâmetro A_v é referente a área do orifício, o parâmetro $H_{o_{i,N}}$ se refere a carga a montante da válvula. C_d é o coeficiente de descarga e $\tau = (C_d A_v)/(C_d A_v)_o$. A equação de carga é:

$$H_{i,N} = H_{i,N-1}(k+1) - B_i [Q_{i,N-1}(k)] - R_i \Delta t Q_{i,N-1}(k) |Q_{i,N-1}(k)| \quad (4.26)$$

5 METODOLOGIA APLICADA

Para este trabalho, duas redes hipotéticas foram criadas: rede 1 e rede 2. A rede 2 foi criada por Walski (1983) e adaptada por Gambale (2000). Em ambas, todas as suas características são conhecidas: comprimento, vazão, diâmetro, rugosidade, celeridade. Para início, em cada uma das redes é feito um teste piloto: um algoritmo genético de 4 (quatro) gerações com população de 20 (vinte) cromossomos para variadas simulações, alterando-se o operador mutação, cruzamento e elitismo. Com os resultados obtidos no teste piloto, escolhe-se as três melhores soluções de cada representação em cada rede. Então cria-se para objeto de estudo o caso de 2 redes da qual cada uma tem 3 representações binárias e 3 representações reais.

O problema consta em identificar a rugosidade de cada tubo da rede de distribuição. Para resolver o problema, é preciso inicialmente preparar os dados de entrada do modelo: pressão, vazões (demandas) nos nós, o nível do reservatório, em conjunto com diâmetros e comprimentos da tubulação, todos em regime permanente. Com os dados do regime permanente obtido, tem-se as condições de contorno para começar o estudo do transiente hidráulico.

Escolhe-se então um nó em cada rede para ser monitorado. O transiente será provocado pela variação da demanda neste nó monitorado. Aplica-se o Método das Características em ambas as redes para cálculo da carga hidráulica no nó monitorado, imprimindo-se as cargas observadas no nó a cada intervalo de tempo Δt definido.

Com isso, dá-se início a aplicação do modelo de otimização transiente inverso para calibração do sistema. Uma geração de cromossomos com possíveis valores de rugosidade das tubulações da rede será gerada. Cada solução gerará novos valores de carga, e cada carga no transiente será comparada através da função objetivo com a carga observada anteriormente em cada intervalo de tempo Δt .

A técnica de otimização - algoritmo genético - foi aplicada no Método Transiente Inverso para encontrar os coeficientes de rugosidade absoluta da rede. Essa técnica gerará um processo de mudanças de possíveis soluções utilizando operadores genéticos: a técnica de elitismo, mutação e crossover, gerando a substituição dos indivíduos, mas conservando os que forem julgados de melhor aptidão. A identificação da rugosidade será obtida pelo algoritmo genético na representação real e binária. Tendo obtido a identificação da rugosidade em ambas representações, compara-se as duas representações.

Na codificação binária, utilizou-se para os operadores: 3 tipos de cruzamento, 1 de mutação, 2 de elitismo. Na codificação real, utilizou-se para os operadores: 4 tipos de cruzamento, 3 de mutação, 2 de elitismo. Gerando respectivamente 6 e 24 casos de estudos.

As três melhores soluções de cada representação foram comparadas entre si. Para as duas redes, utilizou-se Taxa de elitismo de 50%, Taxa de mutação de 2%, Taxa de Cruzamento de 80%. As características gerais das duas redes são dadas na tabela:

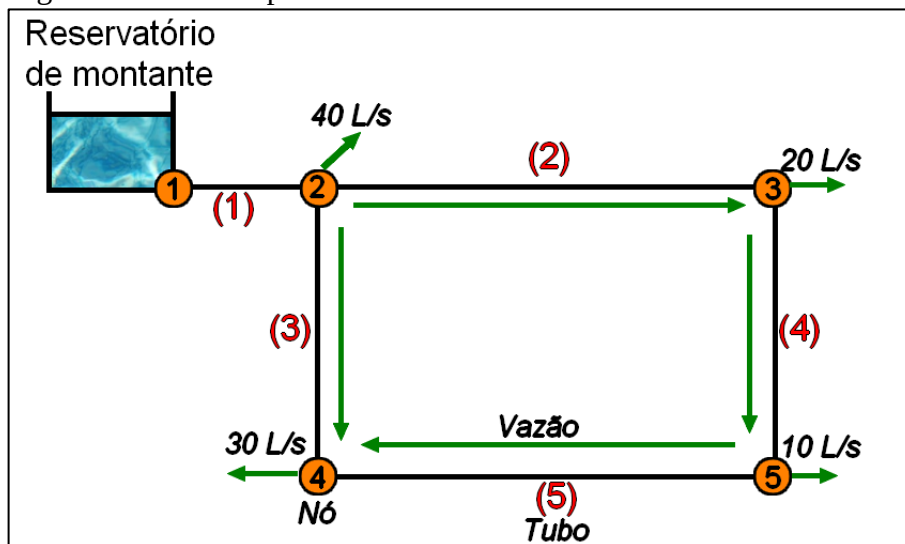
Tabela 5.1 - Características gerais das duas redes

Parâmetro	Rede 1	Rede 2
Quantidade de tubos	5	10
Quantidade de nós	5	8
Nó monitorado	5	4
Tempo de fechamento da válvula (s)	5	5
Taxa de elitismo	50%	50%
Taxa de cruzamento	80%	80%
Taxa de mutação	2%	2%
Número de variáveis	5	10
Tempo de análise do transiente (s)	30	30
Intervalo de tempo Δt (s)	0,1	0,125
Intervalo de espaço Δx (m)	150,00	200,00
Cota piezométrica do reservatório (m)	453	60
E (GPa)	120	120
K (GPa)	2.19	2.19
Poison	0.25	0.25
Esp. dos tubos (mm)	10	10

5.1 Rede 1

Para a rede hipotética 1, utilizou-se a rede representada pela figura 5.1:

Figura 5.1 - Rede hipotética 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na representação da rede hipotética, os nós estão representados pelo círculo laranja contendo sua enumeração e as tubulações representadas por algarismos entre parênteses, na cor vermelha. O sentido do fluxo é o representado pelas setas na cor verde, e as setas que tem sua origem nos nós apresentam a demanda do nó. As características físicas dessa rede – L [$M^0L^1T^0$] o comprimento em metros, D o diâmetro em metros [$M^0L^1T^0$] e ϵ a rugosidade [$M^0L^1T^0$] em milímetros - são conhecidas e são dispostas na tabela Tabela 5.2:

Tabela 5.2 – Parâmetros físicos da rede 1

Tubo	L (m)	D (m)	ϵ (mm)
1	500,00	0,250	0,05
2	700,00	0,200	0,05
3	800,00	0,150	0,05
4	800,00	0,150	0,05
5	700,00	0,150	0,05

Além das características das tubulações, as demandas nos nós também são conhecidas tendo como unidades o litro por segundo, L/s [$M^0L^3T^{-1}$], e a cota topográfica, em metros [$M^0L^1T^0$], conforme mostra na tabela 5.3:

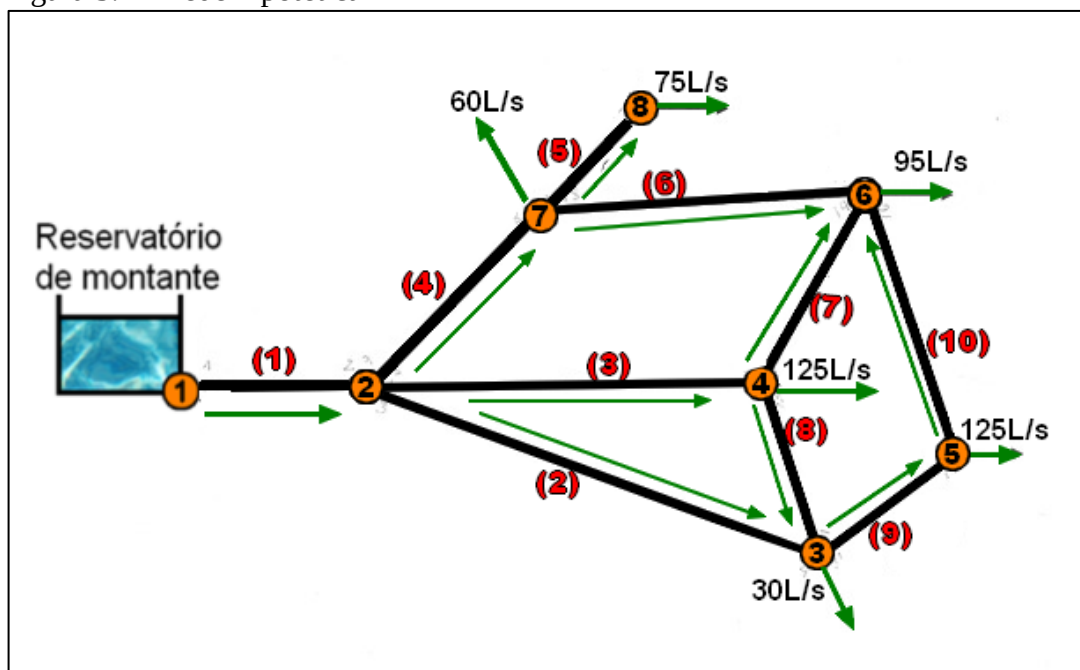
Tabela 5.3 – Característica dos nós na rede 1

Nó	Demanda (L/s)	Z (m)
1	0	453
2	40	400
3	20	405
4	30	410
5	10	420

5.2 Rede 2

Para a segunda rede, utilizou-se a rede representada pela Figura 5.2:

Figura 5.2 - Rede hipotética 2



Fonte: Walski (1983), adaptado pelo autor.

A segunda rede estudada é a rede de distribuição hipotética de Walski (1983), utilizada por Gambale (2000) e adaptada por Araújo (2003). Na representação da rede hipotética 2, os nós estão representados pelo círculo laranja contendo sua enumeração e as tubulações representadas por algarismos entre parênteses, na cor vermelha. O sentido do fluxo é o representado pelas setas na cor verde, e as setas que tem sua origem nos nós apresentam a demanda do nó. As características físicas dessa rede – L o comprimento em metros [$M^0L^1T^0$], D o diâmetro em metros [$M^0L^1T^0$] e ϵ a rugosidade em milímetros [$M^0L^1T^0$] – são conhecidas e são dispostas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Parâmetros físicos da Rede 1

Tubo	L (m)	D (m)	ε (mm)
1	700,00	0,500	0,05
2	1800,00	0,250	0,05
3	1520,00	0,400	0,05
4	1220,00	0,300	0,05
5	600,00	0,300	0,05
6	1220,00	0,200	0,05
7	920,00	0,250	0,05
8	300,00	0,150	0,05
9	600,00	0,200	0,05
10	1220	0,100	0,05

Além das características das tubulações, as demandas nos nós também são conhecidas tendo como unidades o litro por segundo, L/s, e a cota topográfica, em metros, conforme mostra na Tabela 5.5:

Tabela 5.5 – Característica dos nós da rede 2

Nó	Demanda (L/s)	Z (m)
1	0,00	0
2	0,00	0
3	30,00	0
4	125,00	0
5	30,00	0
6	95,00	0
7	60,00	0
8	75,00	0

5.3 A Indexação

Segundo Streeter e Wylie (1978), a indexação tem a função de descrever a geometria e as propriedades de um sistema de tal forma que um programa possa resolver as condições de contorno com eficiência. Sendo assim, cada nó do sistema tem uma maneira única de ser escrito para a linguagem desejada com algumas condições sendo consideradas, tal como no Quadro 5.1:

Quadro 5.1 - Código para indexação dos nós de acordo com os tipos possíveis.

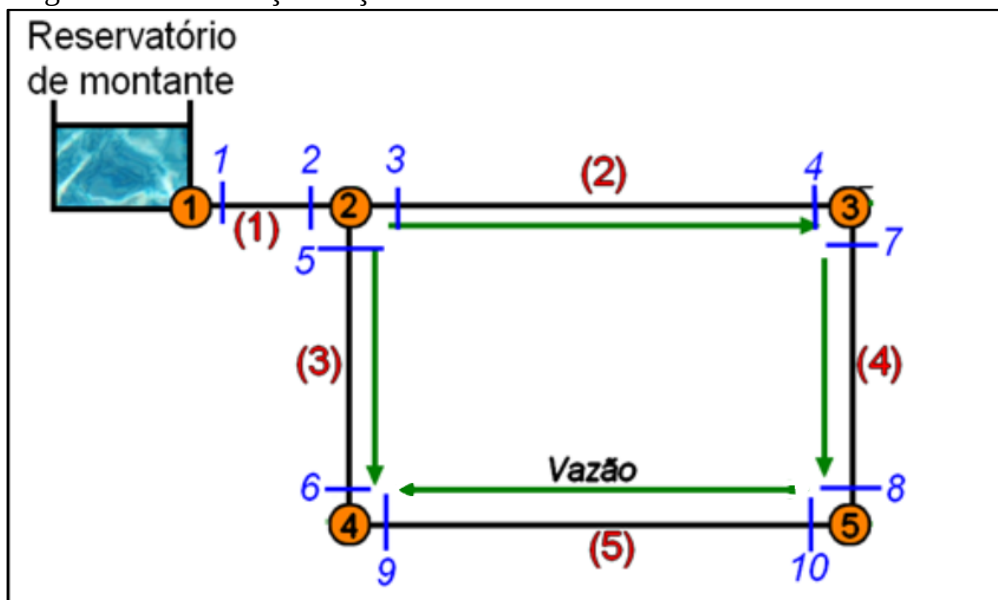
Nó	Quantidade de tubos	Tipo
+	+	Nó comum
+	-	Nó com demanda
-	+	Reservatório
-	-	Válvula

Para cada nó do sistema, uma sequência de algarismo é escrita seguindo o esquema:

1. $\pm$ Número do nó
2. $\pm$ Quantidade tubos que se ligam ao nó
3. $\pm$ Número do tubo
4. $\pm$ Número da seção do tubo no nó
5. $\pm$ Número da seção do tubo no nó seguinte

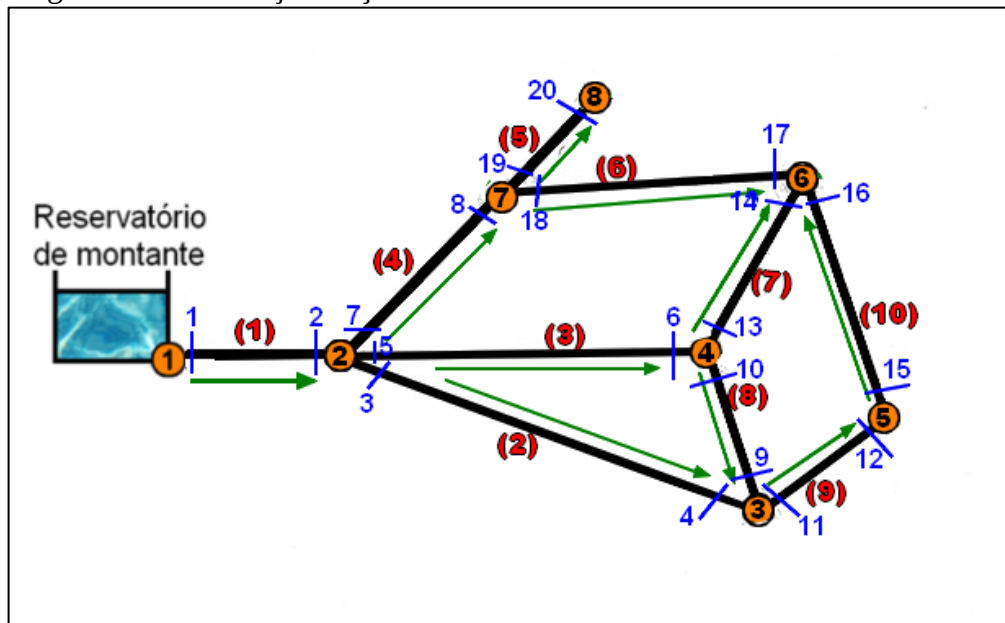
A variação do sinal de mais ou menos ($\pm$) no algarismo que representa o tubo é pelo fato de que o mesmo quando positivo representa a vazão chegando ao nó e negativo quando a vazão está saindo do nó. Nos dois exemplos, todos os nós são do tipo “nó com demanda”, exceto o nó 1, que é referente ao reservatório. A indexação na rede hipotética 1 e da rede hipotética 2 tem suas seções de tubos nos nós representadas respectivamente na Figura 5.3 e Figura 5.4 com um traço na cor azul e sua numeração.

Figura 5.3 – Indexação: seções na rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.4 – Indexação: seções na rede 2



Fonte: Araújo (2003), adaptado pelo Autor.

O arquivo de indexação da Rede 1 e da Rede 2 são mostrados respectivamente na Figura 5.5 e na Figura 5.6:

Figura 5.5 – Indexação da rede 1

indexacao1.dat										
-1	1	-1	1	2						
2	-3	1	2	1	-2	3	4	-3	5	6
3	-2	2	4	3	-4	7	8			
4	-2	3	6	5	5	9	10			
5	-2	4	8	7	-5	10	9	0		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.6 – Indexação da rede 2

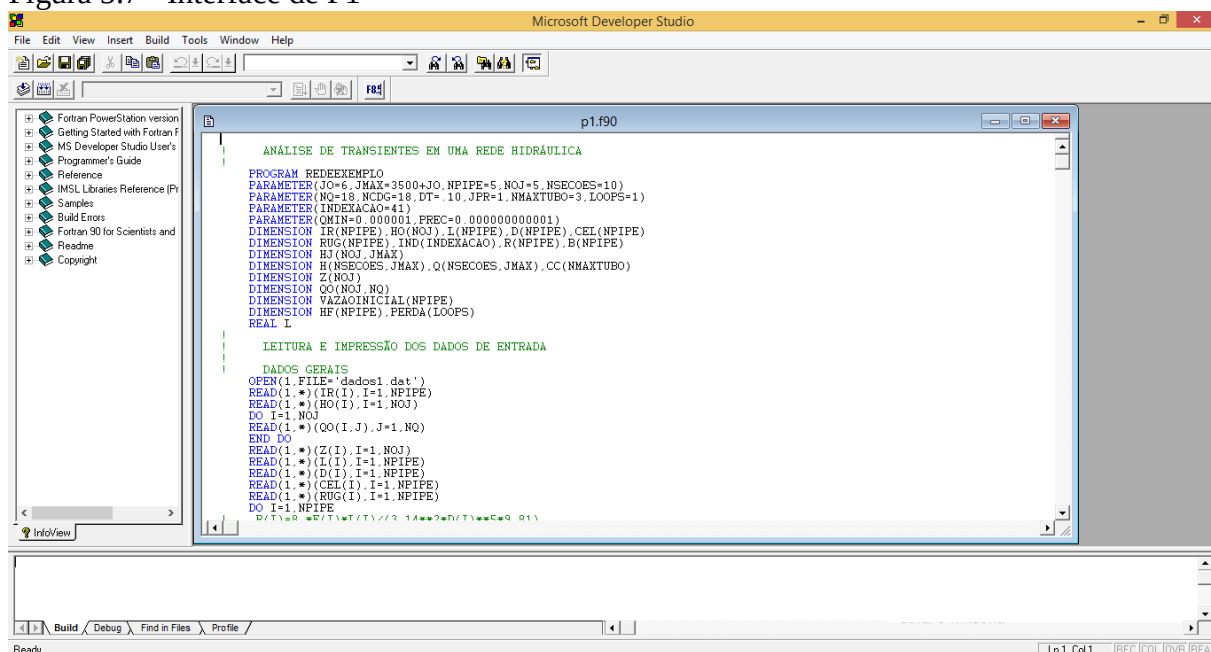
indexacao1.dat													
-1	1	-1	1	2									
2	-4	1	2	1	-2	3	4	-3	5	6	-4	7	8
3	-3	2	4	3	8	9	10	-9	11	12			
4	-3	3	6	5	-7	13	14	-8	10	9			
5	-2	9	12	11	-10	15	16						
6	-3	6	17	18	7	14	13	10	16	15			
7	-3	4	8	7	-5	19	20	-6	18	17			

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 Carga nos nós em Regime Permanente

Os valores das cargas e vazões foram encontrados a partir do simulador P1, desenvolvido por Araújo (2003), utilizando a linguagem FORTRAN. Os dados de entrada são as características físicas apresentadas nos tópicos 5.1 para a rede 1 e no tópico 5.2 para a rede 2. A interface do programa R1 é apresentada na Figura 5.7.

Figura 5.7 - Interface de P1



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.1 Cargas no regime permanente nos nós da rede 1

As cargas hidráulicas $[M^0L^1T^0]$ (m) em cada nó do sistema e as vazões $[M^0L^3T^{-1}]$ (L/s) obtidas em cada tubo do sistema em P1 para a Rede 1 foram as encontradas na Tabela 5.6 e

Tabela 5.7:

Tabela 5.6 – Cargas hidráulicas dos nós da rede 1

Nó	Carga hidráulica (m)
1	453,00
2	446,45
3	442,39
4	437,52

5	438,14
---	--------

Tabela 5.7 - Vazões nos tubos da rede 1

Tubo	Vazão (L/s)
1	100,00
2	36,11
3	23,89
4	16,11
5	6,11

5.4.2 Cargas no regime permanente nos nós da rede 2

Para a rede 2, as cargas hidráulicas $[M^0L^1T^0]$ (m) em cada nó do sistema e as vazões $[M^0L^3T^{-1}]$ (L/s) obtidas em cada tubo do sistema em P1 foram as encontradas na Tabela 5.8 e Tabela 5.9.

Tabela 5.8 – Cargas hidráulicas dos nós na rede 2

Nó	Carga hidráulica (m)
1	60
2	55,76
3	47,71
4	48,05
5	44,59
6	40,85
7	42,09
8	40,27

Tabela 5.9 – Vazões nos tubos na rede 2

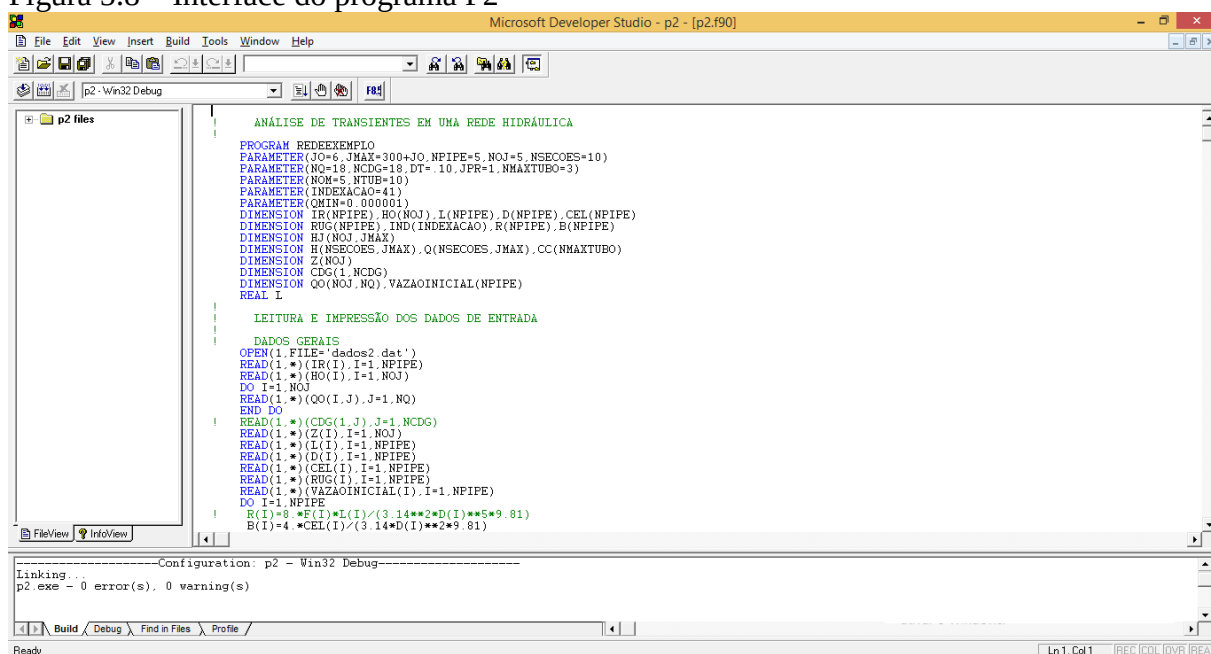
Tubo	Vazão (L/s)
1	414,97
2	56,82
3	209,04
4	149,14
5	75,01
6	14,14
7	76,77
8	7,27
9	34,09
10	4,09

5.5 Carga nos nós e vazões nos tubos em Regime Transiente

Com as vazões e cargas obtidas em regime permanente, o próximo passo é calcular as cargas hidráulicas transientes. Na rede 1, o nó número 5 que tem vazão inicial de 10L/s terá uma variação na demanda, tendo sua vazão zerada em 5 (cinco) segundos. Isso causará uma perturbação na rede e com isso um regime transiente. Na rede 2, o nó 4 que tem vazão 30 L/s também terá a variação na demanda e em 5 (cinco) segundos terá sua vazão zerada.

O cálculo das cargas hidráulicas geradas pela aplicação do regime transiente será feito através de outro programa de Araújo (2003), o simulador P2, que também utiliza a linguagem FORTRAN. O programa terá como saída o valor da carga hidráulica no nó 5 na Rede 1 e no nó 4 na Rede 2. Na rede 1, cada carga hidráulica será calculada a cada $\Delta t=0,1s$ pelo período de 30s. Isso resultará na medição de 300 cargas hidráulicas. Na rede 2, a carga hidráulica será calculada a cada $\Delta t=0,125s$ pelo período de 30s, resultando na medição de 240 cargas hidráulicas. A interface do programa P2 é o visto na Figura 5.8.

Figura 5.8 – Interface do programa P2



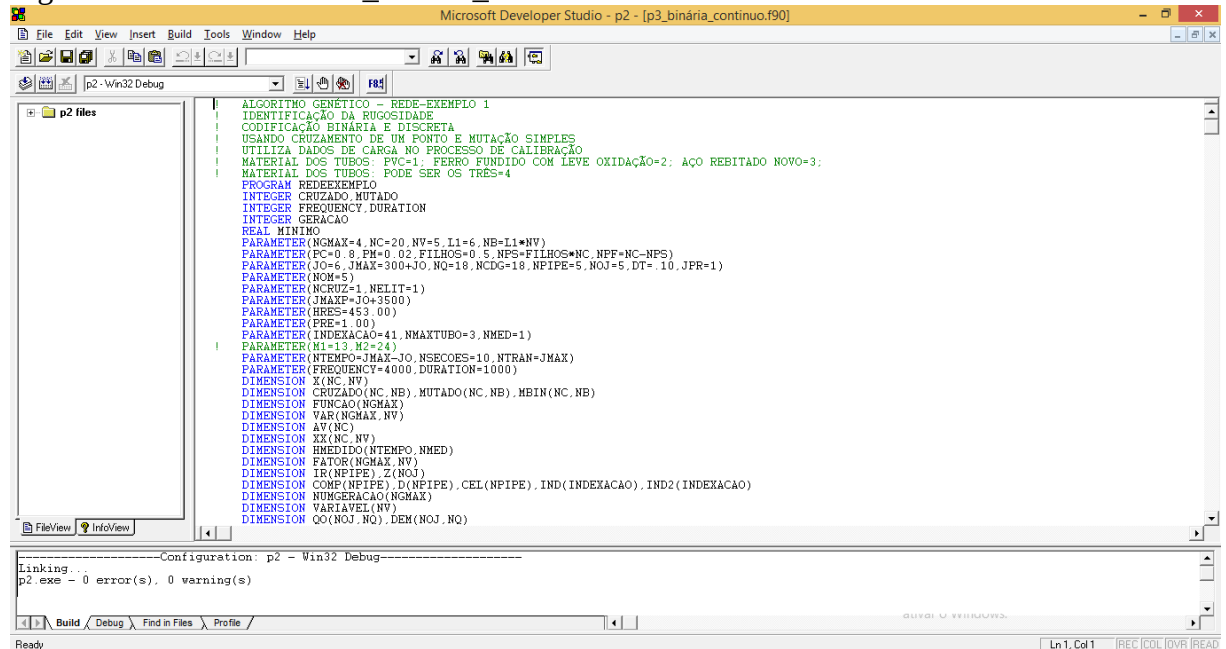
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6 Simulação das Rugosidades em Regime transiente

Além dos dois simuladores aqui demonstrados, Araújo (2003) desenvolveu o programa P3 em duas versões. Uma para algoritmo genético em representação binária, P3_Binária_Contínuo, e outro programa para algoritmo genético em representação real, P3_Real_Contínuo. Ambos na linguagem FORTRAN. Todas as características físicas vistas até

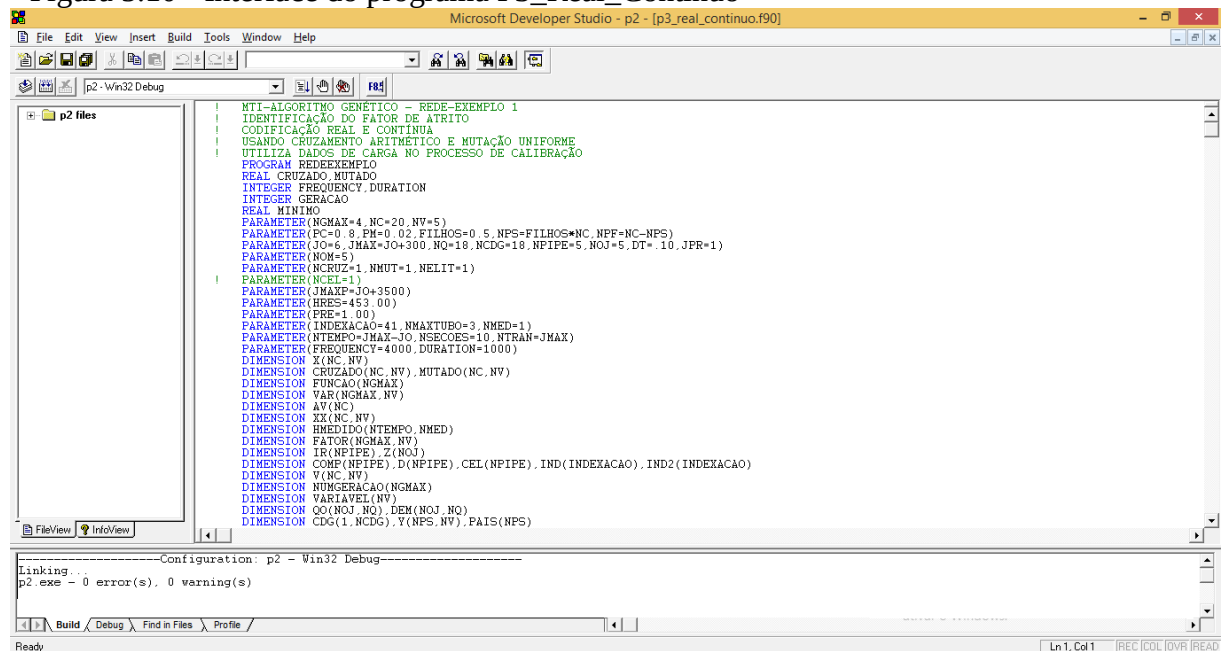
agora foram dados de entrada, com exceção da rugosidade, que é o fator que pretende se descobrir. A carga dos transientes nos nós estudados obtida no programa P2 também se torna dado de entrada nesse programa. As interfaces de P3_Binária_Contínuo e P3_Real_Contínuo são as visualizadas na Figura 5.9 e Figura 5.10.

Figura 5.9 - Interface de P3_Binária_Contínuo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.10 - Interface do programa P3_Real_Contínuo



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.7 Função objetivo em regime transiente

A função objetivo considerada nos cálculos do presente trabalho foi a seguinte:

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^{TS} \left(\frac{H_{i,m} - H_{i,c}}{H_{i,m}} \right)^2 \quad (5.1)$$

da qual TS representa o tempo de duração do transiente, $H_{i,m}$ a carga medida no tempo i, $H_{i,c}$ a carga calculada no tempo i; $i = 1, 2, \dots, TS$.

Na rede 1, a função objetivo será o somatório do quadrado do erro relativo entre a função monitorada e a função calculada, então a função será o somatório do erro relativo quadrático de 300 cargas. Na rede 2, a função objetiva será o somatório do erro relativo quadrático de 240 cargas.

5.8 Configuração do algoritmo genético

Para a representação binária, cada variável dos cromossomos referentes a rugosidade dos tubos terá 6 (seis) algarismos binários, em que a rugosidade poderá variar entre 0,01mm e 0,73mm. Na rede 1, como são 5 tubos, tem-se 5 variáveis. Na rede 2, tem-se 10 tubos, então tem-se 10 variáveis. Cada cromossomo pode representar um número decimal no intervalo de 0 a 63. A representação binária e dos valores decimais da rugosidade pode ser vista na tabela Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Representação binária e decimal das rugosidades

ϵ (mm)	Decimal	Cadeia de binário					
0,010	0	0	0	0	0	0	0
0,011	1	0	0	0	0	0	1
0,012	2	0	0	0	0	1	0
0,013	3	0	0	0	0	1	1
0,014	4	0	0	0	1	0	0
0,015	5	0	0	0	1	0	1
0,016	6	0	0	0	1	1	0
0,017	7	0	0	0	1	1	1
*	*	*	*	*	*	*	*
0,070	60	1	1	1	1	0	0
0,071	61	1	1	1	1	0	1
0,072	62	1	1	1	1	1	0

0,073	63	1	1	1	1	1	1
--------------	----	---	---	---	---	---	---

Se o comprimento da cadeia de bits fosse igual 7, o valor da rugosidade poderia chegar até 0,127mm e o número decimal a 117. Porém, como também sabemos em qual faixa se encontra a rugosidade que procuramos, uma cadeia de seis bits que faça a rugosidade está no intervalo de [0,01; 0,073] é suficiente.

O fluxograma da metodologia do trabalho da simulação das rugosidades em regime transiente obedece a seguinte ordem:

1. Início: escolha da rede e suas características físicas
2. Cálculo das cargas e vazões no regime permanente
3. Cálculo das cargas transientes
4. Geração aleatória da população em representação binária
 - a. Função objetivo calculada
 - b. Aplicação do elitismo
 - c. Aplicação do crossover
 - d. Aplicação da mutação
 - e. Calcular nova função objetivo
 - f. Repetir ciclos até o número máximo de gerações
5. Geração aleatória da população em representação real
 - a. Função objetivo calculada
 - b. Aplicação do elitismo
 - c. Aplicação do crossover
 - d. Aplicação da mutação
 - e. Calcular nova função objetivo
 - f. Repetir ciclos até o número máximo de gerações
6. Imprimir rugosidades
7. Comparar valores ótimos em cada uma das representações

5.9 Medida de eficiência da identificação da rugosidade

Como processo de otimização, nem sempre o resultado obtido é isento de erros. Na identificação da rugosidade, os dados precisam ser de boa qualidade. Para averiguar os

resultados obtidos, dois critérios serão escolhidos para julgar a solução: a função objetivo e o erro relativo médio (ERM).

O erro relativo médio pode ser encontrado através da equação:

$$EMR(\%) = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^n \frac{|\epsilon_i^{real} - \epsilon_i^{estimado}|}{\epsilon_i^{real}} \times 100 \right] \quad (5.2)$$

O fator ϵ^{real} representa a rugosidade real e $\epsilon^{estimada}$ a rugosidade estimada em cada tubo i da rede de distribuição. Cada rede tem N tubos.

6 RESULTADOS E CONCLUSÕES

6.1 Resultados

Conforme mencionado anteriormente, cada rede foi calculada em representação real e binária. A representação real contou com 4 (quatro) operadores de cruzamento, 3 (três) de mutação e 2 (dois) de elitismo, totalizando 24 casos. A representação binária contou com 3 (três) operadores de cruzamento, 1 (um) de mutação e 2 (dois) de elitismo, totalizando 6 casos. Ao todo, 30 (trinta) casos foram estudados por rede. As três melhores soluções ótimas reais e binárias de cada rede baseadas na função objetivo são as vistas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Melhores soluções de cada representação em cada rede

Rede	Representação	Cruzamento	Mutação	Elitismo	$F_{obj} \times 10^4$
1	Real	4	2	2	0,15960
1	Real	4	1	2	0,40830
1	Real	4	3	1	0,49810
1	Binária	3	1	2	0,56330
1	Binária	2	1	2	2,46790
1	Binária	1	1	2	3,16970
2	Real	4	3	1	2,19483
2	Real	3	2	2	2,73761
2	Real	4	1	2	5,55270
2	Binária	3	1	1	5,13617
2	Binária	3	1	2	5,44942
2	Binária	2	1	2	7,72873

Tendo-se obtido para o projeto piloto as três melhores condições de cruzamento, mutação e elitismo, utiliza-se essas mesmas condições, aumenta-se o número de gerações para 50 (cinquenta) e tamanho da população para 100 (cem) cromossomos e, com esse novo

algoritmo genético, uma nova função objetivo é calculada para comparação das representações em cada rede.

Não comentado antes, o programa P3 – para representação real e binária - na busca de encontrar as funções objetivo também imprime o passo a passo de cada geração, sendo possível observar como a função objetivo se comporta em cada geração e também a rugosidade em cada geração. A melhor solução às vezes pode estar na geração de número 25 (vinte e cinco), mas o algoritmo continua seu espaço de busca até a geração de número 50 (cinquenta).

6.1.1 Nova função objetivo da Rede 1

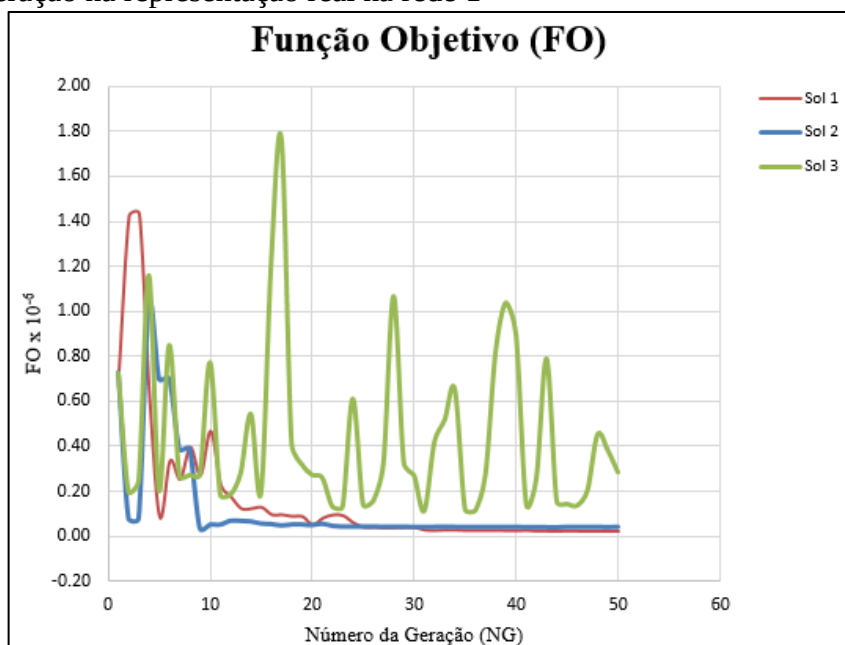
6.1.1.1 Representação real

Para a rede 1, os valores encontrados das 3 (três) melhores soluções ótimas na representação real foram:

- S1 = 0,0000000221
- S2 = 0,0000000328
- S3 = 0,00000011510

Para a rede 1, considerando as três melhores soluções reais, o desenvolvimento da função objetivo na representação real é o encontrado na Figura 6.1.

Figura 6.1 - Comparativo da função objetivo das três melhores soluções a cada geração na representação real na rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

As rugosidades encontradas para cada uma das soluções e os erros relativos e erros relativos médios encontrados em cada rugosidade são encontrados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Rugosidades encontradas na rede 1 na representação real

Tubo	Rugosidade absoluta (mm)				Erro Relativo (%)		
	Observado	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3
1	0,05	0,0538	0,0477	0,0428	7,6	4,6	14,4
2	0,05	0,0315	0,0434	0,0596	37,0	13,2	19,2
3	0,05	0,0531	0,0591	0,0667	6,2	18,2	33,4
4	0,05	0,0510	0,0481	0,0388	2,0	3,8	22,4
5	0,05	0,0456	0,0352	0,0381	8,8	29,6	23,8
EMR (%)					12,3	13,9	22,6

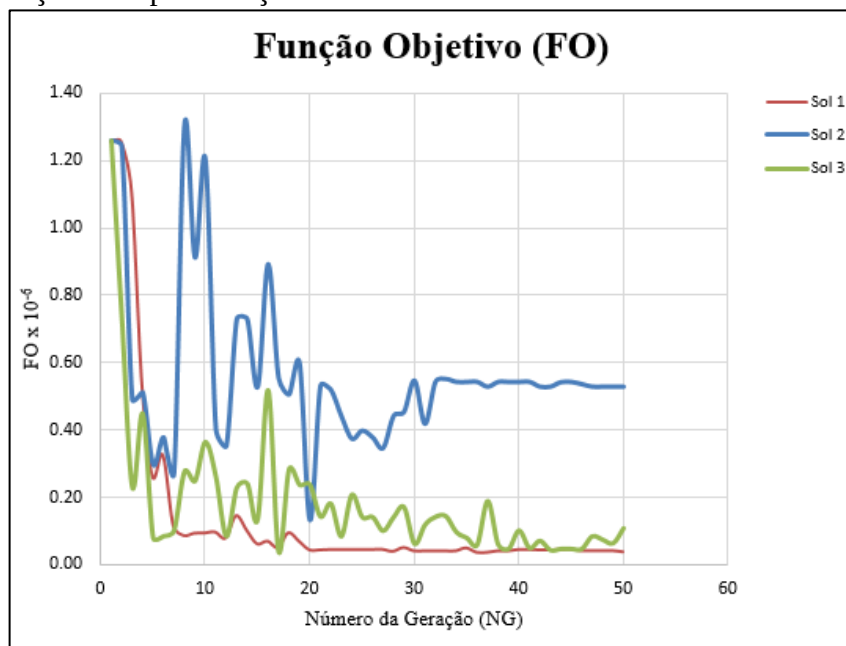
6.1.1.2 Representação binária

Para a rede 1, os valores encontrados das 3 (três) melhores soluções ótimas na representação binária foram:

- S1 = 0,000000037
- S2 = 0,0000001317
- S3 = 0,000000037

Para a rede 1, considerando as três melhores soluções binárias, o desenvolvimento da função objetivo na representação binária é o encontrado na

Figura 6.2 - Comparativo da função objetivo das três melhores soluções a cada geração na representação binária na rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

As rugosidades encontradas para cada uma das soluções e os erros relativos e erros relativos médios encontrados em cada rugosidade são encontrados na Tabela 6.3. Tabela 6.2

Tabela 6.3 - Rugosidades encontradas na rede 1 na representação binária

Tubo	Rugosidade absoluta (mm)				Erro Relativo (%)		
	Observado	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3
1	0,05	0,0590	0,0640	0,0520	18,0	28,0	4,0
2	0,05	0,0180	0,0120	0,0290	64,0	76,0	42,0
3	0,05	0,0530	0,0480	0,0610	6,0	4,0	22,0
4	0,05	0,0500	0,0520	0,0460	0,0	4,0	8,0
5	0,05	0,0500	0,0560	0,0380	0,0	12,0	24,0
EMR (%)					17,6	24,8	20,0

6.1.2 Nova função objetivo da Rede 2

6.1.2.1 Representação real

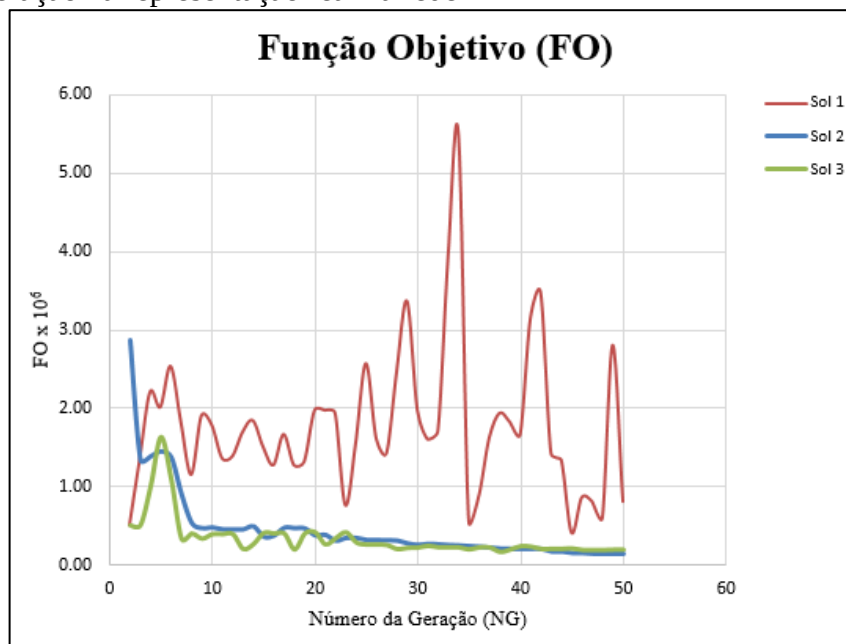
Para a rede 2, os valores encontrados das 3 (três) melhores soluções ótimas na representação real foram:

- S1 = 0,000042032
- S2 = 0,0000144414

- $S3 = 0,0000176971$

Para a rede 2, considerando as três melhores soluções reais, o desenvolvimento da função objetivo na representação real é o encontrado na Figura 6.3.

Figura 6.3 - Comparativo da função objetivo das três melhores soluções a cada geração na representação real na rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

As rugosidades encontradas para cada uma das soluções e os erros relativos e erros relativos médios encontrados em cada rugosidade são encontrados na Tabela 6.4. Tabela 6.2

Tabela 6.4 - Rugosidades da rede 2 na representação real

Tubo	Rugosidade absoluta (mm)				Erro Relativo (%)		
	Observado	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3
1	0,05	0,0546	0,0583	0,0347	9,2	16,6	30,6
2	0,05	0,0517	0,0571	0,0634	3,4	14,2	26,8
3	0,05	0,0455	0,0431	0,0566	9,0	13,8	13,2
4	0,05	0,0460	0,0445	0,0651	8,0	11,0	30,2
5	0,05	0,0524	0,0601	0,0347	4,8	20,2	30,6
6	0,05	0,0155	0,0324	0,0609	69,0	35,2	21,8
7	0,05	0,0551	0,0458	0,0509	10,2	8,4	1,8
8	0,05	0,0404	0,0427	0,0367	19,2	14,6	26,6
9	0,05	0,0532	0,0377	0,0256	6,4	24,6	48,8
10	0,05	0,0107	0,0664	0,0217	78,6	32,8	56,6
EMR (%)					21,8	19,1	28,7

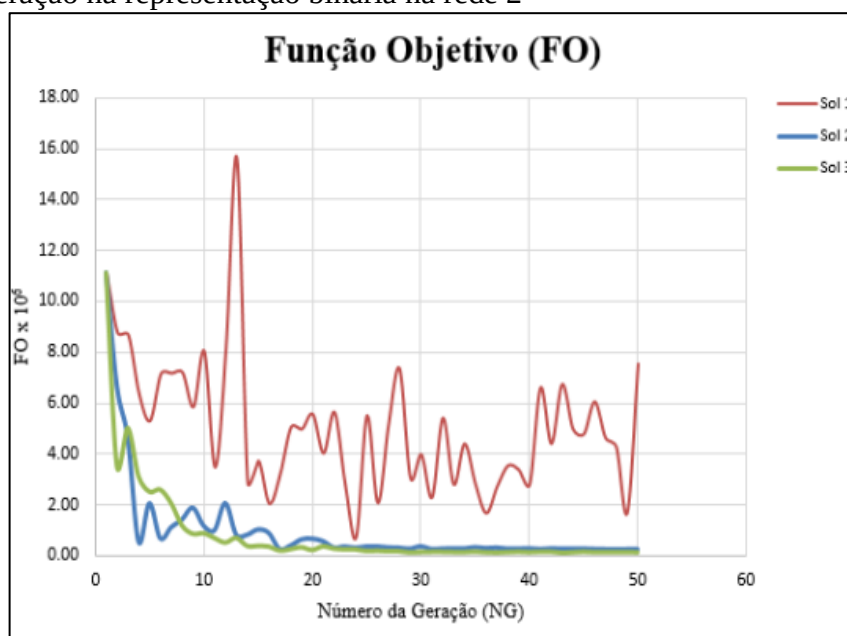
6.1.2.2 Representação binária

Para a rede 2, os valores encontrados das 3 (três) melhores soluções ótimas na representação binária foram:

- S1 = 0,0000709876
- S2 = 0,0000234043
- S3 = 0,0000134393

Para a rede 2, considerando as três melhores soluções binárias, o desenvolvimento da função objetivo na representação binária é o encontrado na Figura 6.4.

Figura 6.4 - Comparativo da função objetivo das três melhores soluções a cada geração na representação binária na rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

As rugosidades encontradas para cada uma das soluções e os erros relativos e erros relativos médios encontrados em cada rugosidade são encontrados na Tabela 6.4. Tabela 6.2

Tabela 6.5 - Rugosidades da rede 2 na representação real

Tubo	Rugosidade absoluta (mm)				Erro Relativo (%)		
	Observado	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3	Sol. 1	Sol. 2	Sol. 3
1	0,05	0,0360	0,0520	0,0440	28,0	4,0	12,0
2	0,05	0,0480	0,0270	0,0400	4,0	46,0	20,0

3	0,05	0,0580	0,0590	0,0540	16,0	18,0	8,0
4	0,05	0,0640	0,0470	0,0580	28,0	6,0	16,0
5	0,05	0,0120	0,0150	0,0640	76,0	70,0	28,0
6	0,05	0,0450	0,0100	0,0400	10,0	80,0	20,0
7	0,05	0,0470	0,0660	0,0480	6,0	32,0	4,0
8	0,05	0,0630	0,0630	0,0600	26,0	26,0	20,0
9	0,05	0,0220	0,0480	0,0710	56,0	4,0	42,0
10	0,05	0,0320	0,0310	0,0520	36,0	38,0	4,0
EMR (%)					28,6	32,4	17,4

6.2 Conclusões

Vários pesquisadores têm discutido qual a melhor representação, a binária ou a real, e muitos deles tem mostrado experimentos favoráveis à representação real (MICHALEWICZ, 1994). Porém a função objetivo não pode ser a única variável a ser considerada para a decisão de qual o melhor método. Isso porque, dentro da rede, podem conter valores próximos da rugosidade de muitos tubos, mas alguns serem muito discrepantes da realidade e com isso alterar bruscamente a função objetivo; o ideal é que a resolução ofereça a maior fidelidade possível as rugosidades reais.

6.2.1 Rede 1

Considerando 20% um número aceitável para o erro médio relativo e o erro relativo, entre as rugosidades apresentadas na Tabela 6.2, a solução 1 e a solução 2 encontram EMR abaixo dos 20%. Porém o EMR da solução 3 está bem próximo dos 20%. Dentro dos Erros Relativos, a solução 3 apresenta todos acima de 10%, enquanto a solução 2 apresenta 2 e a solução 1 apresenta apenas 1. Observando a Figura 6.1, a solução 3 foi a que mais oscilou, enquanto a solução 1 e 2 apresentaram convergência mais rápida. Ainda assim, a solução 1 obteve funções objetivos melhores que a solução 2. Observando suas rugosidades e função objetivo, escolhe-se a solução 1 como a melhor da representação real na rede 1.

Observando agora a Tabela 6.3, a solução 1 obteve EMR abaixo de 20%, enquanto a solução 3 obteve exatamente o valor limite. Duas das rugosidades encontradas na solução 1 são exatamente iguais às rugosidades observadas. No tubo 2, seu erro foi o maior da solução 1, porém ainda menor que o tubo 2 da solução 2. A solução 3 obteve 3 ER acima dos 20%. Observando a Figura 6.2, a solução 2 demorou para convergir, enquanto a solução 1 e solução

3 iam obtendo funções objetivas bem menores. A solução 1 obteve praticamente a partir da 18ª geração a menor função objetiva em todas as gerações abaixo das funções objetivas da solução 2. Sendo assim, a solução 1 da representação binária também foi escolhida.

Comparando-se a solução 1 da representação binária com a solução 1 da representação real, o gráfico que mostra as funções objetivas a cada geração é o obtido na Figura 6.5.

Figura 6.5 - Comparação entre as melhores soluções da rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

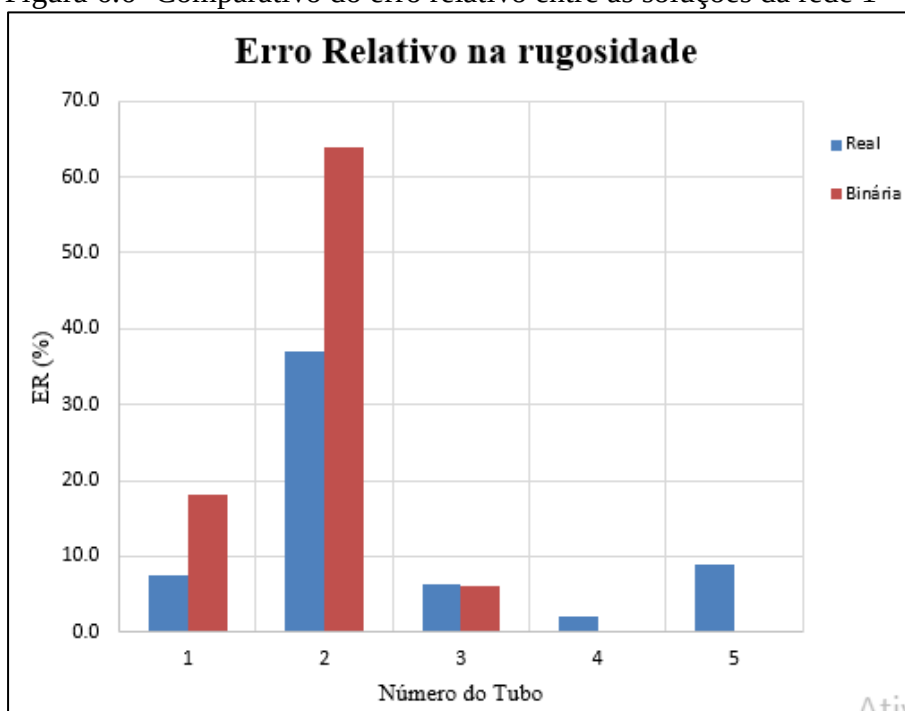
Sendo a melhor função objetivo da solução 1 da representação real e binária muito próximas, e observando a Figura 6.5 também encontrando valores muito próximos, compara-se o valor identificado de rugosidade tubo a tubo, como na tabela Tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Comparação entre as rugosidades das melhores soluções na rede 1

Tubo	Observado	Estimado		Erro relativo (%)		Menor ER (%)	Melhor representação
		Real	Binária	Real	Binário		
1	0,05	0,0538	0,0590	7,6	18,0	7,6	Real
2	0,05	0,0315	0,0180	37,0	64,0	37,0	Real
3	0,05	0,0531	0,0530	6,2	6,0	6,0	Binário
4	0,05	0,0510	0,0500	2,0	0,0	0,0	Binário
5	0,05	0,0456	0,0500	8,80	0,0	0,0	Binário

Em 60% dos casos, a representação binária obteve Erro Relativo menor. Porém se observar atentamente os números, o tubo 3 foi decidido por uma diferença tão pequena que chega a ser capaz de dizer que seriam iguais. Com isso, não é possível afirmar qual seria a melhor representação entre o real e o binário. Porém olhando-se para os valores dos demais, no tubo 2 a representação real excedeu e muito o erro quando comparado a solução binária. A solução binária então seria a melhor representação para essa rede. O comparativo gráfico entre os Erros Relativos é o visto na Figura 6.6.

Figura 6.6- Comparativo do erro relativo entre as soluções da rede 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.2 Rede 2

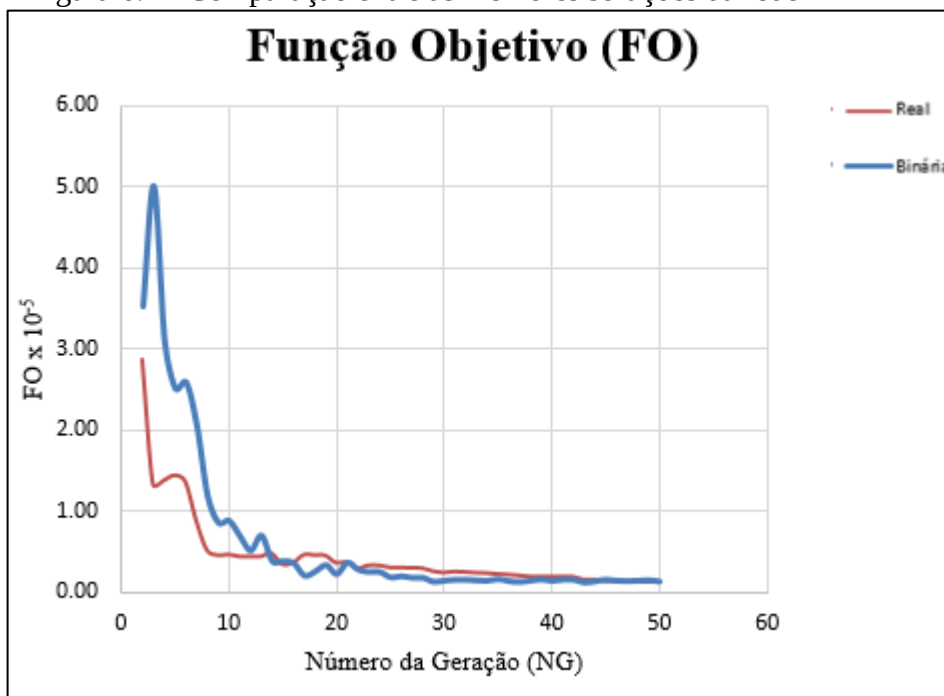
Para a representação real e também considerando 20% um número aceitável para o erro médio relativo e o erro relativo, entre as rugosidades apresentadas na Tabela 6.4, a solução 2 foi a que obteve menor EMR, mas a solução 1 também encontra-se próximo ao valor limite. Na comparação de Erro Relativo, a solução 1 apresenta apenas 4 rugosidades com ER acima de 10%, enquanto na solução 2 apresenta 9. A solução 3 também apresentou 9 ER de rugosidades acima de 10%.

Observando a Figura 6.3, a solução 1 foi a que mais oscilou, enquanto a solução 2 e 3 apresentaram convergência mais rápida. Com isso, escolhe-se a solução 2 como a melhor da representação real na rede 2.

Para a representação binária, observando-se a Tabela 6.5, apenas a solução 3 obteve um EMR abaixo de 20%. Observando o gráfico na Figura 6.4, solução 1 oscilou bastante, enquanto a solução 2 e 3 convergiram praticamente igualmente. Como em cada geração, função objetiva da solução 3 está quase sempre abaixo da solução 2, toma-se a solução 3 como a melhor solução da representação binária na rede 2.

Comparando-se a solução 2 da representação real com a solução 3 da representação binária, o gráfico que mostra as funções objetivas a cada geração é o obtido na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Figura 6.7 - Comparação entre as melhores soluções da rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando-se o valor identificado de rugosidade tubo a tubo na Tabela 6.7.

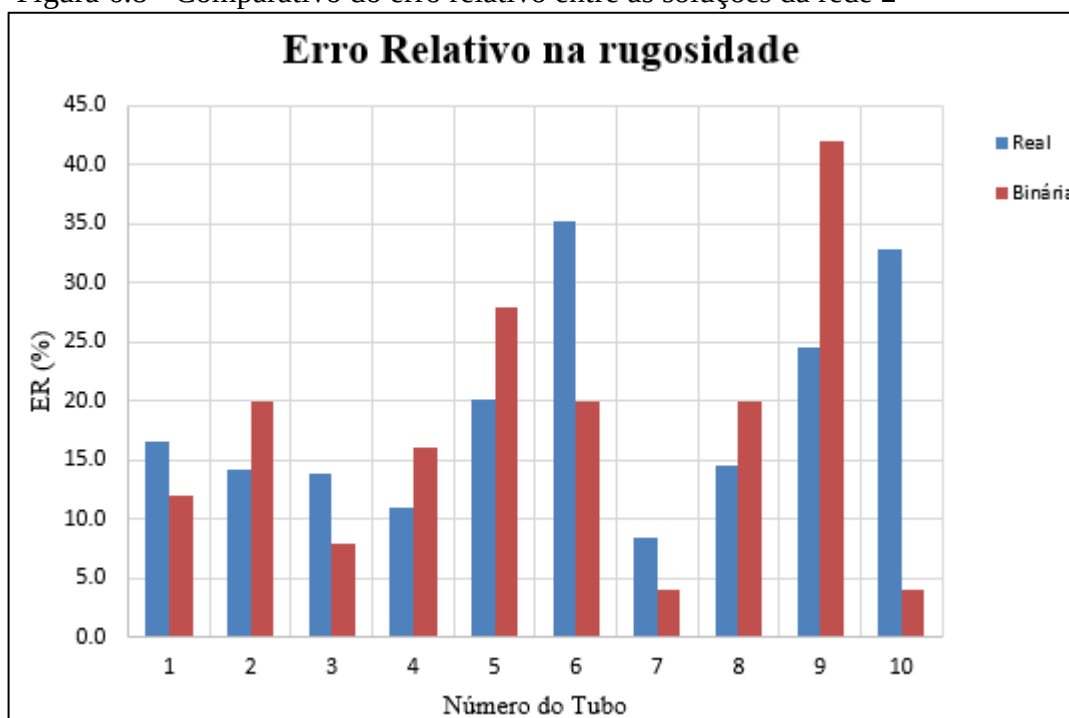
Tabela 6.7 - Comparativo entre as melhores rugosidades da rede 2

Tubo	Observado	Estimado		Erro relativo (%)		Menor ER (%)	Melhor representação
		Real	Binária	Real	Binário		
1	0,05	0,0583	0,0440	16,60	12,00	12,00	Binário
2	0,05	0,0571	0,0400	14,20	20,00	14,20	Real

3	0,05	0,0431	0,0540	13,8	8,0	8,0	Binário
4	0,05	0,0445	0,0580	11,0	16,0	11,0	Real
5	0,05	0,0601	0,0640	20,20	28,0	20,20	Real
6	0,05	0,0324	0,0480	8,4	4,0	4,0	Binário
7	0,05	0,0458	0,0480	8,4	4,0	4,0	Binário
8	0,05	0,0427	0,06	14,6	20,0	14,6	Real
9	0,05	0,0377	0,0710	24,60	42,00	24,60	Real
10	0,05	0,0664	0,0520	32,80	4,00	4,00	Binário

Nessa rede, não foi possível dizer qual das duas representações é melhor, ambas tiveram desempenho melhor igual 50% nas rugosidades identificadas. Porém, devido ao EMR da binária ser relativamente menor do que o EMR da representação real, considera-se essa representação como a melhor para a rede. O comparativo gráfico entre os Erros Relativos é o visto na Figura 6.8.

Figura 6.8 - Comparativo do erro relativo entre as soluções da rede 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.3 Conclusão final

Nas duas redes, o algoritmo de representação binária obteve melhor solução, porém por uma diferença mínima. Quanto maior o número de variáveis, mais propenso ao erro ficaram as representações, basta verificar o EMR nas redes 1 e 2. Uma menor função objetivo não

garantirá a melhor solução quando comparada com outras representações, mas guiará para um valor próximo ao melhor. As soluções mostraram que quando há um grande número de gerações tendem a convergir acima da 20ª geração. No desenvolver das simulações, alguns casos de algoritmo binário mostraram levar maior tempo para otimizar, e mesmo assim esses casos não ficaram entre os três melhores.

A técnica de otimização dos Algoritmos Genéticos é compatível para identificação das rugosidades de redes de água, e apesar do fato de quanto maior o tamanho da população, mais baixa a velocidade para convergir, isso em nada interfere para aplicação do método. Na identificação dos parâmetros da rede, seria ideal o conhecimento das possibilidades de transientes que possam ocorrer na mesma, além das suas durações, pois são fatores que influenciam na definição dos parâmetros do algoritmo genético.

Acreditava-se que a última geração de cada modelo é a que obteria o menor valor objetivo. Porém ao observar os gráficos da função objetivo em cada geração, percebe-se que esses valores ficam oscilando próximo ao mesmo valor, e nessa pequena variação se obteve a melhor função objetivo. Para comprovar isso, depois mudou-se o número de gerações de 100 para 200, 400, 500, 800 e 1000. Quanto maior era o número de gerações, menor era a função objetiva e menor também foram os erros médios relativos. No exemplo que se utilizou 1000 gerações, o Erro médio relativo chegou a ser de apenas 2%, com os erros médios ficando bem abaixo de 5%. A amplitude do espaço de busca fez com que se minimizassem os erros, porém, como desvantagem, aumentou o tempo de solução.

6.3 Recomendações para próximas pesquisas

Até mesmo na hidráulica, onde se conhecendo o material da tubulação é possível limitar bem a faixa em que se encontra a rugosidade, o espaço de busca ainda é muito grande. Quanto maior for o espaço de busca, maior o erro. Como alternativa para diminuir o espaço de busca, sugere-se utilizar outras formas para a geração da população, tal como a logaritmo, o exponencial, o quadrado, função raiz quadrada, fatorial e até mesmo a raiz cúbica.

Também é recomendado ver um estudo dessas mesmas igualando o mesmo número de fatores de operação. No caso a mutação do real se reduziria a um único tipo, assim como no binário. Comparar os resultados com casos iguais.

Por fim, a recomendação de variar as funções objetivos e de verificar se vai interferir mais no algoritmo genético o tamanho da população, o número de gerações ou a quantidade de variáveis a serem descobertas.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. K. **Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado a escoamento transiente**. 2003. 196 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- ADEWUYA, A. **New Methods in Genetic Search with Real-Valued Chromosomes**. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1996
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.218** – Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- AZEVEDO NETTO, J. A.; FERNANDEZ, M. F.; ARAUJO, R.; ITO, A. E. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1998
- BARBOSA, M. P. R. **Modelagem Computacional de Chaminés de Equilíbrio e Tanques de Alimentação Unidirecional Como Dispositivos Atenuadores do Golpe de Ariete em Adutoras**. 2006. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006.
- BEZERRA, S. T. M.; CHEUNG, P. B. **Perdas de água: tecnologias de controle**. 1. ed. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013. 220 p.
- DAVIS, L. **Handbook of genetic algorithms**. Van Nostrand Reinhold, 1991.
- DEJONG, K. **The analysis and behaviour of a class of genetic adaptive systems**. University of Michigan, 1975. (PhD thesis)
- GAMBALE, S. R. **Aplicação de algoritmo genético na calibração de rede de água**. 2000. 266 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- GEN, M.; CHENG, R. **Genetic algorithms and engineering design**. Wiley Series in Engineering Design and Automation, John Wiley & Sons, 1997.
- GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**, Addison-Wesley, 1989.
- GOMES, H. P. **Sistemas de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias**. 3. ed. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2009. 277 p.
- HELLER, L.; PÁDUA, V. L. (org.). **Abastecimento de água para consumo humano**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. 2 v.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. MIT Press, 1975.

LACERDA, E. G. M.; CARVALHO, A. C. P. L. F. **Introdução aos algoritmos genéticos**. In: GALVÃO, C. O & VALENÇA, M. J. S. (org.). *Sistemas Inteligentes*. Porto Alegre: ABRH, 1999. p. 99-150.

LESSA, R. C. **Transientes Hidráulicos em Sistemas Complexos de Adução de Água**. 1984. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1984

MANKIW, N. G. **Princípios de macroeconomia**. Tradução Allan Vidigal Hastings, Elisete Paes e Lima, Es2 Translate, revisão técnica Manuel José Nunes Pinto. – São Paulo: CENGAGE Learning, 2015.

MELATO, D. R. **Discussão de uma metodologia para o diagnóstico e ações para redução de perdas de água: aplicação no sistema de abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Hidráulica e Saneamento) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2010.

MICHALEWICZ, Z. **Handbook of evolutionary computation**. New York/Bristol: Institute of Physics Publishing and Oxford University Press, 1997.

ORSINI, E. Q. **Sistemas de Abastecimento de Água. Apostila da Disciplina PHD 412 – Saneamento II**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP. 2006. 540 p.

ROCHA, V. A. G. M. **Avaliação de Calibração de Redes Hidráulicas usando o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo (MIGHA) Aplicado a Escoamento Transiente**. 2013. 151 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará, 2013.

SANTOS, R. M. N. **Modelagem computacional do golpe de Aríete em adutoras**. 2000. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2000.

STREETER, Victor L., WYLIE, E. Benjemim. **Fluid Transients**. Nova York. McGrawHill Editora, 1978.

THORNTON, J.; STURM, R.; KUNKEL, G. **Water Loss Control Manual**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

VASCONCELOS, J. G. **Hidráulica Transiente Aplicada a Saneamento**. 2008. (Curso de curta duração ministrado/Outra).

WALSKI, T.M. **Technique for Calibrating Network Models**. J. Water Res. Plng na Mgmt, ASCE, V. 109, n. 4, p. 360-372, 1983.