



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **SIMULADOR DE TUBULAÇÕES COM INTERFACE GRÁFICA**

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

(PIBIC/CNPq/INPE)

Fabício Iusuti de Medeiros (INPE, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [fabricao.iusuti@lac.inpe.br](mailto:fabricao.iusuti@lac.inpe.br)

Dr. Jerônimo dos Santos Travelho (LAC/CTE/INPE, Orientador)  
E-mail: [jeff@lac.inpe.br](mailto:jeff@lac.inpe.br)

**Julho de 2007**



## SUMÁRIO

RESUMO	4
INTRODUÇÃO	5
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
ATIVIDADES REALIZADAS	18
RESULTADOS OBTIDOS	38
CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

## RESUMO

Este trabalho realizado no PIBIC/INPE 2006/2007, trata da implementação do software, SIMULADOR DE TUBULAÇÕES COM INTERFACE GRÁFICA. A idéia de fazer a terceira versão do programa surgiu vista a necessidade de aumentar os recursos do mesmo, buscando uma maior variedade de situações nas possíveis simulações de escoamento. A implementação desses novos recursos foi feita na linguagem de programação C/C++ no ambiente de desenvolvimento Borland (Buidar C++),

As atividades consistiram em atribuir ao programa a permissão da inclusão de bifurcações na tubulação, a possibilidade da inserção de anéis na mesma e a obtenção da influência da interação dos acessórios na tubulação.

A parte estrutural de programação do software não sofreu alterações, houve apenas o acréscimo de funções e procedimentos para que o mesmo realizasse as novas atividades corretamente.

Um novo método para o cálculo de anéis na tubulação foi criado, já que a introdução do método de Hardy Cross atenderia a necessidade dos cálculos, porém traria algumas dificuldades na implementação, e na utilização do programa pelo usuário. Para simplificar esse procedimento foi criado um modelo que conta com um método iterativo que tenta satisfazer a equação da continuidade no problema. Para o funcionamento do modelo o usuário deve informar ao programa um valor estimado para: as pressões nos nós, ou as vazões nos ramos. Entende-se que o usuário não conheça essas informações, então o método utiliza essas informações supostas e as filtra, até satisfazer a continuidade do sistema, obtendo resultados satisfatórios de pressões e vazões na tubulação.

O funcionamento do programa e a parte gráfica continuam os mesmos, o software vem com um manual de instruções, e para a terceira versão foi criado um guia de ajuda rápida ao usuário no menu principal do programa para o auxílio na execução das funções do software.

O objetivo do programa continua sendo obter tanto para tubos quanto para acessórios os fenômenos de mecânica dos fluidos existentes no escoamento: diferença de pressões, número de Reynolds, fator de atrito nos tubos, perda de cargas localizada e total, vazão e velocidade do fluido.

## **CAPITULO 1**

# **INTRODUÇÃO**

O trabalho proposto tem como objetivo continuar na implementação de recursos para o software de simulação de escoamentos em condutos forçados, visando torna-lo mais abrangente aos casos de escoamentos em tubulações. Os recursos implantados nessa fase do trabalho são: permitir a inclusão de bifurcações na tubulação e inserir entre as opções de projeto, o calculo de redes hidráulicas com anéis.

A continuação de um trabalho consiste em seguir uma base criada, e aperfeiçoá-la buscando cada vez mais versatilidade nas funções do mesmo. Assim como na versão anterior houve uma preocupação em integrar a parte gráfica do projeto com os cálculos, uma forma de possibilitar um melhor planejamento e visualização da tubulação ao usuário, e permitindo que diversas configurações da tubulação sejam feitas até que se obtenha uma solução adequada para o projeto.

Os softwares para a elaboração de projetos de tubulações têm a finalidade de se tornarem ferramentas para a automatização de cálculos em projetos, tais como: encontrar diferenças de pressão, velocidade do escoamento, número de Reynolds entre outros parâmetros ocorrentes em mecânica dos fluidos. A automatização de cálculos em projetos de tubulações vem sendo utilizada intensamente por engenheiros e projetistas nos últimos anos a fim da obtenção de resultados rápidos e precisos.

Atualmente, o avanço tecnológico permite serem criadas varias ferramentas para a automatização de diversas áreas, e nos permite também aperfeiçoá-las, tornando-as cada vez mais rápidas e confiáveis.

Com isso faz-se importante a realização desse trabalho, uma vez que a simulação de um projeto torna-se uma prática essencial para a concretização de um trabalho, afinal nessa etapa são permitidos erros e até novas experiências, comprovando ou não a viabilidade de um projeto. Portanto utilizar instrumentos que facilitem e torne confiável essa etapa é muito importante.

## **CAPITULO 2**

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

## Linguagens de Programação

Um programa de computador é um conjunto instruções que representam um algoritmo para a resolução de algum problema. Estas instruções são escritas através de um conjunto de códigos (símbolos e palavras). Este conjunto de códigos possui regras de estruturação lógica e sintática própria. Dizemos que este conjunto de símbolos e regras forma uma linguagem de programação.

Podemos dividir, genericamente, as linguagens de programação em dois grandes grupos: as linguagens de **baixo nível** e as de **alto nível**:

Linguagens de baixo nível: São linguagens voltadas para a máquina, isto é, são escritas usando as instruções do microprocessador do computador. São genericamente chamadas de linguagens Assembly.

Vantagens: Programas são executados com maior velocidade de processamento. Os programas ocupam menos espaço na memória.

Desvantagens: Em geral, programas em Assembly têm pouca portabilidade, isto é, um código gerado para um tipo de processador não serve para outro. Códigos Assembly não são estruturados, tornando a programação mais difícil.

Linguagens de alto nível: São linguagens voltadas para o ser humano. Em geral utilizam sintaxe estruturada tornando seu código mais legível. Necessitam de compiladores ou interpretadores para gerar instruções do microprocessador. Interpretadores fazem a interpretação de cada instrução do programa fonte, executando-a dentro de um ambiente de programação Basic e AutoLISP por exemplo.

Compiladores fazem a tradução de todas as instruções do programa fonte gerando um programa executável. Estes programas executáveis (\*.exe) podem ser executados fora dos ambientes de programação, C e Pascal, por exemplo. As linguagens de alto nível podem distinguir-se quanto a sua aplicação em genéricas como C, Pascal e Basic ou específicas como Fortran (cálculo matemático), GPSS (simulação), LISP (inteligência artificial) ou CLIPPER (banco de dados).

Vantagens: Por serem compiladas ou interpretadas, tem maior portabilidade podendo ser executados em varias plataformas com pouquíssimas modificações. Em geral, a programação torna-se mais fácil por causa do maior ou menor grau de estruturação de suas linguagens.

Desvantagens: Em geral, as rotinas geradas (em linguagem de maquina) são mais genéricas e, portanto mais complexas e por isso são mais lentas e ocupam mais memória.

## **Linguagem de programação C**

A linguagem C é uma linguagem de alto nível, genérica. Foi desenvolvida por programadores para programadores tendo como meta características de flexibilidade e portabilidade. O C é uma linguagem que nasceu juntamente com o advento da teoria de linguagem estruturada e do computador pessoal. Assim tornou-se rapidamente uma linguagem “popular” entre os programadores. O C foi usado para desenvolver o sistema operacional UNIX, e hoje esta sendo usada para desenvolver novas linguagens, entre elas a linguagem C++ e Java.

Entre as principais características do C, podemos citar:

- O C é uma linguagem de alto nível com uma sintaxe bastante estruturada e flexível tornando sua programação bastante simplificada.
- Programas em C são compilados, gerando programas executáveis.
- O C compartilha recursos tanto de alto quanto de baixo nível, pois permite acesso e programação direta do microprocessador. Com isto, rotinas cuja dependência do tempo é crítica, podem ser facilmente implementadas usando instruções em Assembly. Por esta razão o C é a linguagem preferida dos programadores de aplicativos.
- O C é uma linguagem estruturalmente simples e de grande portabilidade. O compilador C gera códigos mais enxutos e velozes do que muitas outras linguagens.

Embora estruturalmente simples (poucas funções intrínsecas) o C não perde funcionalidade pois permite a inclusão de uma farta quantidade de rotinas do usuário. Os fabricantes de compiladores fornecem uma ampla variedade de rotinas pré-compiladas em bibliotecas.

**Programação orientada a objeto:** é uma extensão da programação estruturada, e consiste no desenvolvimento de algoritmos, usados para a solução de problemas, onde a estrutura de dados usada pelas funções encontra-se, separada da organização do programa (código que implementa a estrutura de dados e algoritmos da classe), sendo necessária a definição da coleção de tipos de objeto.

O objeto é a característica principal desse tipo de programação, sendo este um componente que contém características (propriedades), e representa o elemento do problema. Nele podem ser executadas ações (métodos necessários para a solução do problema), que são definidos junto à definição da classe. Dessa maneira, pode-se dizer, que a programação orientada a objetos preocupa-se mais com os dados a serem manipulados do que com os métodos que os manipulam.

**Programação orientada á eventos:** Um evento é uma forma de atuar com o usuário e as classes. A Programação Orientada a Objetos e a Programação Orientada a Eventos são facilmente confundidas, porém a primeira contém a segunda, mas a segunda não contém a primeira. Assim um objeto pode existir mesmo que não exista nenhum evento associado a ele, mas um evento não pode existir se não houver um objeto a ele associado.

Pode-se dizer que a programação orientada a eventos significa que a programação responde a eventos (como clicar em um botão, selecionar um texto), ou seja, o programa não se restringe à uma seqüência pré-estabelecida. Dessa maneira, é necessário escrever um código para ações executadas pelo usuário.

## **Princípios de Mecânica dos Fluidos**

### **Viscosidade**

A viscosidade dos fluidos traduz-se pela resistência que estes oferecem à deformação. Assim, no seu escoamento desenvolvem-se forças resistentes, que dão parte à dissipação de parte da energia mecânica possuída pelo fluido em movimento.

Ao pretender modificar-se a forma de uma massa de fluido, observa-se que as camadas do mesmo se deslocam umas em relação às outras, até que se alcance uma nova forma. Durante este processo ocorrem tensões tangenciais (esforços de corte) que dependem da viscosidade e da velocidade do fluido.

O comportamento de um fluido sob a ação de um esforço de corte é importante na medida em que determinará a forma como ele se movimentará. A fim de que se possa introduzir a noção de esforço de corte (tensão tangencial), torna-se necessário analisar as forças exteriores que atuam numa determinada massa de fluido sujeita à acção da aceleração da gravidade.

Num fluido em repouso não existem tensões tangenciais e de acordo com a lei de Pascal a pressão num ponto é igual em todas as direcções. Nos fluidos em movimento, em que se manifeste a acção da viscosidade desenvolvem-se tensões tangenciais ou esforços de corte.

A viscosidade é uma propriedade física que é definida como sendo a resistência de um fluido ao seu escoamento uniforme. Considere-se duas placas paralelas de fluido, S, que se movem a uma distância,  $n \Delta$ , a uma velocidade relativa  $v \Delta$ . A força necessária para o deslocamento será:

$$\Delta F = \mu S \frac{\Delta v}{\Delta n}$$

Logo, em termos de tensão unitária temos

$$\tau = \frac{\Delta F}{S} = \mu \frac{\Delta v}{\Delta n}$$

onde,  $\mu$  é o coeficiente de viscosidade dinâmica.

A viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) para um determinado fluido é determinada recorrendo a tabelas ou a gráficos enquanto que a viscosidade cinemática ( $\nu$ ) é expressa da seguinte maneira:

$$\nu = \mu / \rho$$

onde  $\rho$  é a massa volumétrica do fluido.

A viscosidade cinemática nos líquidos varia apreciavelmente com a temperatura, sendo desprezável a influência da pressão. Sendo a viscosidade uma propriedade física que determina a resistência ao escoamento uniforme de um fluido, ela afeta a distribuição do esforço de corte destes.

Analisando o comportamento dos fluidos em função do esforço e a velocidade de corte, podemos classificá-los os fluidos da seguinte maneira:

- **Fluido Ideal** - apresenta resistência nula à deformação;
- **Fluido Newtoniano** - o esforço de corte é proporcional à velocidade de corte, sendo  $\tau$  o declive da reta;
- **Fluido não Newtoniano** - deforma-se de tal maneira que o esforço de corte não é proporcional à velocidade de corte;
- **Plástico Ideal** - o fluido sustém, inicialmente, um esforço sem qualquer deformação, deformando-se posteriormente de forma proporcional ao esforço de corte;
- **Sólido Ideal** - não ocorre deformação para qualquer valor de tensão.

Os Fluidos Newtonianos são praticamente todos os líquidos orgânicos e inorgânicos enquanto que os Fluidos não Newtonianos podem ser classificados em pseudoplásticos, dilatantes, Bingham, etc.

Como exemplos de Fluidos não Newtonianos podem-se destacar a pasta de celulose, algumas tintas, borracha, etc.

## Compressibilidade

A compressibilidade dos fluidos traduz-se pela diminuição do volume ocupado por uma determinada massa de líquido quando aumenta a pressão a que esta está sujeita. De acordo com o seu comportamento sob a ação de uma pressão aplicada exteriormente os fluidos podem ser classificados da seguinte forma:

- **Incompressíveis** - Se o volume de um elemento de fluido é independente da sua pressão e temperatura. Nos líquidos as pequenas variações de pressão, podem-se considerar incompressíveis para a maior parte dos fenômenos.

- **Compressíveis** - Se o volume de um elemento de fluido varia com a sua pressão e temperatura, como acontece nos gases.

Note-se, contudo que nenhum dos fluidos reais é completamente incompressível. No entanto, os líquidos podem ser encarados como tal para efeitos de estudo de grande parte das aplicações práticas. É no entanto, é importante ressaltar que em alguns fenômenos, como por exemplo na análise do choque hidráulico, deve ser considerada a compressibilidade do fluido.

### **Classificação dos escoamentos**

O escoamento é variável se, numa dada secção transversal, a velocidade média e o caudal variarem com o tempo.

O escoamento é permanente se, em qualquer secção transversal, a área da secção líquida e a velocidade média (e, portanto o caudal) forem invariáveis com o tempo. Num escoamento permanente a velocidade pode variar de ponto para ponto, mas, em cada ponto, mantêm-se constante ao longo do tempo.

Um escoamento uniforme é um movimento permanente em que a velocidade é constante ao longo de uma mesma trajetória (em módulo, direção e sentido). Pode então dizer-se que o escoamento é uniforme se as trajetórias forem retilíneas e paralelas e se a área da secção líquida,  $S$ , a velocidade média,  $V$ , forem invariáveis com o tempo e a secção transversal considerada. O movimento uniforme só é possível em condutas e canais de eixo retilíneo e de secção constante.

Escoamentos transitórios são escoamentos que se estabelecem na transição entre duas situações de escoamentos permanentes.

### **Escoamentos laminares e escoamentos turbulentos**

Existem dois regimes de escoamento de fluidos: **laminar** e **turbulento**. O regime laminar é caracterizado por trajetórias regulares das partículas, não se cruzando trajetórias de partículas vizinhas.

No escoamento turbulento, a velocidade num dado ponto varia constantemente em grandeza e direção, sem regularidade. As trajetórias são extremamente irregulares. A relação entre as forças de inércia e a força de viscosidade sobre a partícula pode ser expressa pelo número de Reynolds através da seguinte expressão:

$$R_e = \frac{V \times D}{\nu}$$

O número de Reynolds define as condições de semelhança quando a natureza das forças intervenientes se limita às indicadas (caso de escoamento de líquidos no interior de condutas em pressão).

Para valores de Reynolds superiores a 2500 o escoamento é geralmente turbulento e para valores inferiores a 2000 o escoamento é normalmente laminar. A quase totalidade das aplicações de sistemas de pressurização encontra-se em regime turbulento.

## **Teorema de Bernoulli**

Considerando um regime estacionário (as variáveis do processo, como por exemplo, pressão, temperatura, volume, etc. permanecem constantes ao longo do tempo), num fluido Newtoniano e incompressível, a energia específica total duma partícula é igual à energia mecânica total da partícula por unidade de peso e apresenta três componentes:

$$E = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$$

Dimensionalmente cada parcela corresponde a um comprimento pelo que é assimilável a uma soma de "alturas":

$$[E] = \frac{[F] \times [L]}{[F]} = [L]$$

O significado físico de cada parcela será o seguinte

Z = cota da partícula em relação a um plano de referência (energia potencial de posição da partícula por unidade de peso)

$p/\gamma$  = altura piezométrica: energia potencial de pressão por unidade de peso da partícula;

$v^2/2g$  = altura cinética: energia cinética por unidade de peso da partícula com velocidade  $v$ .

Assim, define-se Linha Piezométrica como o lugar geométrico dos pontos em que a sua cota é a soma da cota topográfica e da altura ( $z + p/\gamma$ ). Analogamente, a Linha de Carga (ou Energia) será o lugar geométrico dos pontos cuja cota será a soma da cota topográfica, a altura piezométrica e a altura cinética.

$$\left( z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \right).$$

O Teorema de Bernoulli refere que no caso se um fluido incompressível em regime permanente, em que se possam desprezar as forças de atrito e, conseqüentemente as perdas de energia, mantêm a carga total de uma partícula ao longo de uma trajetória. Aplicando o Teorema a fluidos pesados e incompressíveis, em regime permanente, toma a seguinte forma:

$$\left( z_1 + \beta_1 \frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{U_1^2}{2g} \right)_{i1} - \left( z_2 + \beta_2 \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{U_2^2}{2g} \right)_{i2} = \Delta H \pm \Delta B$$

O teorema de Bernoulli representa uma equação de balanço de energia pois iguala a variação da energia mecânica total entre duas secções de um tubo de corrente ao trabalho realizado pelas forças locais de inércia (nulas em regime permanente) e de resistência  $\Delta H$ .

Na prática, pode-se considerar:

\*  $\beta_1 = \beta_2 = 1,0 \rightarrow$  Coeficiente de distribuição de pressão (campo de pressões do tipo hidrostático – condutas de pequeno e médio diâmetro).

\*  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1,0 \rightarrow$  Coeficiente de energia cinética ou de Coriolis (distribuição de velocidades – consideração de velocidades médias). Correção das velocidades, pois a distribuição da velocidade na secção não é retangular ( $1,00 \leq \alpha \leq 1,15$ ). A parcela  $\Delta B$  corresponde a troca de energia com o exterior:

$+\Delta B$  □ cedência de energia (turbina)

$-\Delta B$  □ ganho de energia (bomba).

A parcela  $\Delta H$  representa o trabalho das forças resistentes por unidade sendo a soma das seguintes parcelas:

$$\Delta H = \Delta H_p + \sum \Delta H_L$$

com,

$\Delta H \rightarrow$  Forças resistentes totais por unidade de peso (perdas de carga totais)

$\Delta H_p \rightarrow$  Perda de carga uniforme (contínua ou principal)

$\sum \Delta H_L \rightarrow$  Somatório de perdas de carga localizadas (concentradas acidentais)

## **Redes Hidráulicas**

As redes de condutas consideram-se sistemas complexos porque são constituídas por tubagens ligadas em série e/ou paralelo, formando feixes ou malhas de condutas. Estes sistemas aparecem normalmente nas redes de abastecimento de água municipais ou industriais e nas redes de combate a incêndios.

Chama-se nó ao ponto de intersecção de três ou mais condutas e malha, todo o circuito fechado constituído por três ou mais condutas ligadas em série. Diz-se que uma conduta tem distribuição de percurso quando sofre uma variação de caudal ao longo do seu percurso (escoamento em regime permanente variado).

Nas redes ramificadas a direção do escoamento é única e, portanto conhecida. Logo, conhecendo-se os caudais e os diâmetros é possível de imediato o cálculo das perdas de carga. Nas redes emalhadas o conhecimento do valor e sentido dos caudais, em cada troço, são obtidos após o equilíbrio da malha através da Lei da Continuidade (em cada nó os caudais afluentes devem igualar os caudais efluentes) e Lei das Malhas (numa malha a soma algébrica das perdas de carga em todas as condutas deve ser nula)

## **Tipos de Redes**

A concepção geométrica do sistema de reservatórios e tubulações, que definem uma rede de distribuição, depende do porte da cidade a ser abastecida, bem como de

características viárias e topográficas. De modo geral, qualquer que seja o desenho da rede, esta é constituída por condutos que são classificados como: condutos principais ou condutos troncos e condutos secundários. Os condutos principais são aqueles de maior diâmetro que têm por finalidade abastecer os condutos secundários, enquanto estes, de menor diâmetro, têm a função de abastecer diretamente os pontos de consumo do sistema.

De acordo com a disposição dos condutos principais e o sentido de escoamento nas tubulações secundárias, as redes são classificadas como rede ramificada e rede malhada. A rede é classificada como ramificada quando o abastecimento se faz a partir de uma tubulação tronco, alimentada por um reservatório de montante ou mesmo sob pressão de um bombeamento, e a distribuição da água é feita diretamente para os condutos secundários, e o sentido da vazão em qualquer trecho da rede é conhecido.

Esta concepção geométrica é utilizada para o abastecimento de pequenas comunidades, acampamentos, granjas, sistemas de irrigação por aspersão etc. A Figura 1.1 apresenta um esquema desse tipo de rede.

Conforme a Figura 1.1, os pontos de derivação de vazão e/ou de mudança de diâmetro são chamados de nós e a tubulação entre dois nós é chamada de trecho, o sentido do escoamento se dá da tubulação tronco para as tubulações secundárias, até as extremidades mortas ou pontas secas.

O padrão geométrico da rede ramificada impõe que a distribuição da vazão fique condicionada à tubulação tronco, de modo que, se ocorrer um rompimento numa seção qualquer por exemplo a seção A, toda a área a jusante ficará prejudicada.

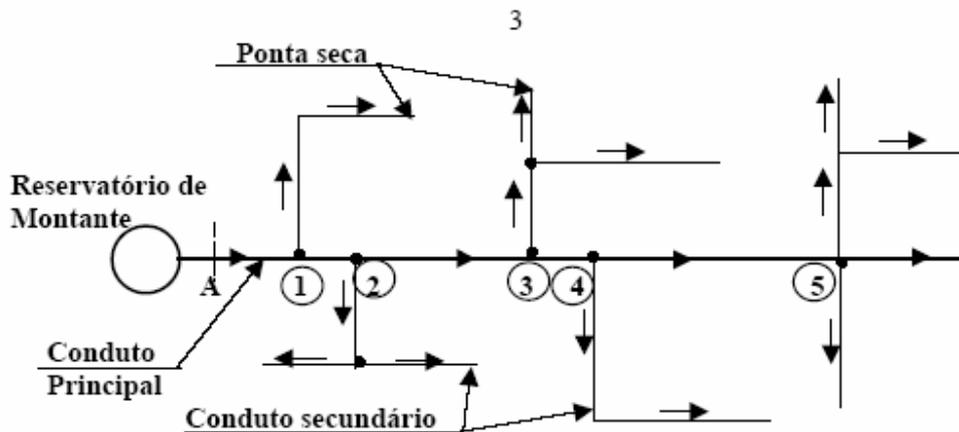


Figura 1.1 Esquema de uma rede ramificada.

As redes malhadas, em vez de possuírem uma única tubulação tronco, são constituídas por tubulações tronco que formam anéis ou malhas, nos quais há possibilidade de reversibilidade no sentido das vazões, em função das solicitações de demanda. Com esta disposição, 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.

O esquema geométrico de uma rede malhada, mostrado na Figura 1.2, é o mais comum na maioria das cidades, nas quais o sistema viário tem um desenvolvimento em várias direções (radial).

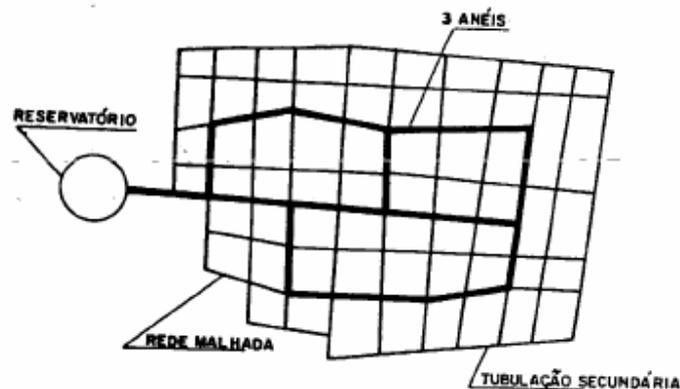


Figura 1.2 Esquema de uma rede malhada com três anéis ou malhas.

Qualquer que seja o tipo da rede, malhada ou ramificada, o projeto deve satisfazer algumas condições hidráulicas limitantes, como pressões, velocidades e diâmetros. Quase sempre a topografia do terreno é o fator determinante no projeto de uma rede, e como os comprimentos das tubulações são razoáveis, as perdas de carga distribuídas propiciam uma diminuição nas cotas piezométricas dos nós e, em consequência, nas pressões disponíveis.

Como norma, o projeto deve garantir uma carga de pressão dinâmica mínima de 10mca (100Kpa), para permitir o abastecimento de um prédio de 02 pavimentos e uma carga de pressão estática máxima de 50mca (500Kpa), a fim de reduzir as perdas por vazamentos nas juntas das tubulações.

Em sistemas de porte, em que há diferenças de cotas topográficas superiores a 60 m, é conveniente dividir a rede em zonas de pressão, de modo evitar pressões excessivas nos pontos baixos da rede. O controle das pressões mínima e máxima pode ser feito através da instalação de bombas ou válvulas redutoras de pressão, respectivamente.

As redes malhadas são projetadas com diâmetro mínimo de 4" nos condutos principais (anéis), admitindo-se 3" para núcleos urbanos com população de projeto inferior a 5000 habitantes, e diâmetro mínimo de 2" na rede secundária. Em geral, as perdas de carga unitárias nas tubulações normalmente utilizadas variam entre  $J = 0,1 \text{ m}/100 \text{ m}$  a  $1 \text{ m}/100 \text{ m}$ . Perdas unitárias desta ordem correspondem, em média, a velocidades entre 0,60 m/s e 1,20 m/s, faixa de velocidade que resulta mais satisfatória do ponto de vista operacional e econômico.

## CAPITULO 3

### ATIVIDADES REALIZADAS

Para essa fase do trabalho, iniciado em Agosto, o objetivo foi implementar novos recursos e funções ao programa, para que o mesmo pudesse obter simulações com anéis e bifurcações na tubulação. Houve a necessidade de rever e verificar o funcionamento de todas as funções do programa, houve também um período de testes e experiências com o software em diversas simulações para a localização de possíveis erros na compilação do software.

Após algumas tentativas foram encontradas algumas deficiências no funcionamento do mesmo, como por exemplo:

- a) na repetição de um mesmo modelo, o programa apresentou resultados diferentes;
- b) o software não conseguia abortar um projeto e iniciar outro em seguida.

Para a solução desses problemas foram feitas revisões na programação a fim de encontrar algum erro de linguagem. Para o primeiro caso, uma constatação analítica levou a uma verificação nas funções que determinavam o calculo das propriedades do escoamento no programa, foram verificadas: Equação de Swame, Equação de Bernoulli e as demais passagens dos cálculos.

Após algumas verificações foram encontrados pequenos erros na linguagem de programação na equação de Swame, onde um erro de declaração de variável, causou a desabilitação de uma das partes da equação. Com isso foi possível reparar o erro e a compilação dos resultados voltou a ser feita corretamente.

Já no segundo caso houve um trabalho maior para a detecção do problema, afinal a função de inicialização (função que inicializa um projeto) estava funcionando corretamente, e então a alternativa foi alterar as bibliotecas do programa, nesse processo, foi descoberta uma declaração errada na biblioteca da função de desenho (função que desenha a tubulação na tela inicial do programa, conforme a mesma é criada pelo usuário), quando se abortava um projeto as informações para o desenho continuavam contidas na memória do programa, e quando o mesmo era submetido á um novo projeto o mesmo não conseguia receber novas informações para o desenho. Com as mudanças na biblioteca essa função também passou a funcionar corretamente.

Visto que os primeiros meses foram de verificações e reparos, os meses de Outubro e Novembro serviram para o planejamento das mudanças propostas para o programa. Para

saber qual caminho seguir em relação as alterações, foi feita uma descrição de todo o funcionamento do software, desde as estruturas até as funções, para identificarmos quais partes deveriam ser alteradas para a inserção dos novos recursos, algo que foi importante para o esclarecimento de algumas dúvidas a respeito do funcionamento do programa. Essa descrição foi um estudo sobre a programação do software, algo importante para as pretensões do projeto.

Em Dezembro e Janeiro, a parte de programação foi deixada de lado momentaneamente, isso porque há também uma preocupação em atualizar não somente a parte funcional do programa, mas também a parte gráfica e interativa do mesmo. Para isso houve a idéia de criar um guia de ajuda rápida ao usuário no menu principal do programa. O guia traz ajudas para: criar uma tubulação, calcular as propriedades do escoamento, mudar as vistas da tubulação, mudar as cores do programa, entre outros. Essa é uma forma de ajudar o usuário a executar corretamente todas as funções do software.

Terminado o estudo sobre o programa e as verificações necessária para o perfeito funcionamento do software, o programa estava pronto para receber as atualizações, e nessa etapa também já eram conhecidas os passos a serem seguidos no trabalho.

O primeiro passo para a inclusão dos recursos foi um estudo em hidráulica em tubulações com ligações em paralelo e outro sobre o método de Hardy Cross, que é o método que calcula as propriedades de mecânica dos fluidos em redes hidráulicas.

Consultando algumas bibliografias pudemos conhecer o método de Hardy Cross e resolver exemplos de redes hidráulicas com o método.

## **Método de Hardy Cross**

O cálculo do escoamento de água em uma rede malhada envolvendo um grande número de tubulações é muito mais complexo que nos sistemas hidráulicos simples com número de trechos pequeno. É claro que a solução do problema está baseada também nas equações e princípios aplicados às redes ramificadas, sistemas em paralelo etc. Na resolução do problema de distribuição de vazões pelos trechos de uma rede malhada e na determinação das cotas piezométricas nos nós, uma série de equações simultâneas pode ser estabelecida. Estas equações são escritas de modo a satisfazer duas condições básicas para o equilíbrio do sistema, que são:

a) A soma algébrica das vazões em cada nó da rede é igual a zero, conforme mostra a figura 1.5.

b) A soma algébrica das perdas de carga (partindo e chegando ao mesmo nó) em qualquer circuito fechado dentro do sistema (malhas ou anéis) é igual a zero. Para aplicação dessas duas condições, em geral, convencionou-se que as vazões que afluem ao nó são positivas, e as que dele derivam são negativas. Para os anéis, convencionou-se como sentido positivo de percurso o sentido horário, de modo que as vazões e, conseqüentemente, as perdas de carga, serão positivas se forem coincidentes como sentido prefixado de percurso, e negativas, caso contrário. A Figura 1.6 mostra a convenção a ser utilizada nas aplicações.

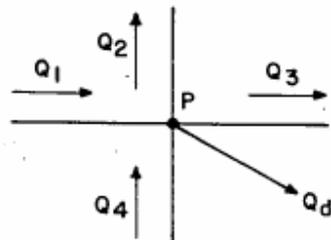


Figura 1.5

$$\Sigma Q = Q_1 - Q_2 - Q_3 - Q_d + Q_4 = 0$$

onde :  $Q_d$  = vazão de distribuição no nó.

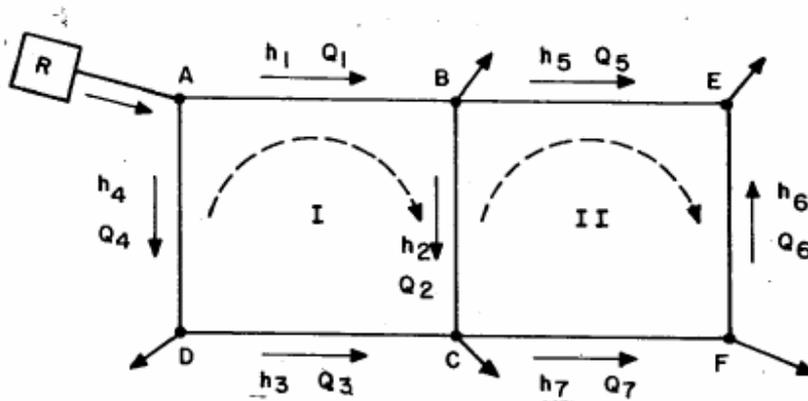


Figura 1.6

Convenção utilizada nas aplicações

Sentido de encaminhamento prefixado = sentido horário

**Anel I:**

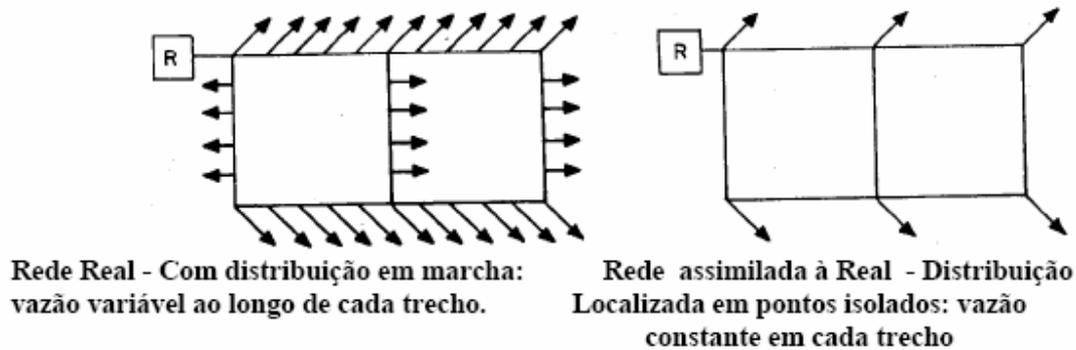
$$\Sigma H = H1 + H2 - H3 - H4 = 0$$

**Anel II:**

$$\Sigma H = -H2 + H5 - H6 - H7 = 0$$

**e  $\Sigma Q = 0$  em cada nó**

Para efeito de projeto, pode-se admitir, com precisão satisfatória, que a distribuição de água em marcha seja substituída por tomadas localizadas em pontos fictícios isolados, adequadamente situados na canalização. Nestas condições, considerar-se á uma vazão uniforme escoando-se em cada trecho de canalização. Vide Figura 1.7.



**Figura 1.7**

No cálculo da perda de carga em cada trecho da rede utiliza-se uma equação de resistência na forma  $\Delta H = K.Qn$ .

Como regra geral, uma rede malhada com m anéis ou malhas e n nós gera um total de  $m + (n - 1)$  equações independentes, e à medida que a complexidade da rede aumenta, cresce proporcionalmente o número de equações. Evidentemente, uma solução algébrica da rede torna-se impraticável e então se lança mão de um método de aproximações sucessivas, com auxílio do computador, prático e muito adequado para o problema, denominado método de Hardy Cross.

O método de Hardy Cross destaca-se dentre os métodos de aproximações sucessivas para o cálculo de redes malhadas, por possibilitar o desenvolvimento manual dos cálculos, em sistemas simples, além de ser um método provido de significado físico, que facilita a

análise dos resultados intermediários obtidos. O método de Hardy Cross é aplicado aos condutos principais (anéis principais) de uma rede malhada, a partir de alguns pressupostos do projeto e traçado da rede.

**a)** Uma vez lançados os anéis da rede, baseado em critérios urbanísticos de distribuição de demanda, densidade populacional, vazão máxima admissível na rede secundária, vetores de crescimento da área a ser abastecida etc., são definidos pontos fictícios convenientemente localizados nas tubulações. Tais pontos, para efeito de cálculo, substituem, do ponto de vista de demanda, uma certa fração da área a ser abastecida, de modo a transformar vazões por unidade de área em vazões pontuais. Imagina-se que toda a rede seja suprida através dos anéis, em pontos fictícios de descarregamento, que serão os nós da rede, para efeito de aplicação do método.

**b)** Conhecendo-se a topografia da área, a distância entre dois nós será o comprimento do trecho a ser dimensionado ou, se o diâmetro já for especificado, o trecho a ser determinada a vazão e as pressões nas extremidades.

**c)** Admite-se que a distribuição em marcha que ocorre nos trechos que formam os anéis seja substituída por uma vazão constante.

**d)** Supõem-se conhecidos os pontos de entrada e saída de água (reservatórios, adutoras e os nós distribuídos nos anéis) e os valores das respectivas vazões.

**e)** Atribui-se, partindo dos pontos de alimentação, uma distribuição de vazão hipotética  $Q_a$  pelos trechos dos anéis, obedecendo em cada nó à equação da continuidade  $\sum Q_i = 0$ .

**f)** Para cada trecho de cada anel, conhecendo-se o diâmetro (que pode ser pré-dimensionado pela condição de velocidade limite da Tabela 1.1), o comprimento e o fator de atrito, calcula-se o somatório das perdas de carga em todos os anéis. Se para todos os anéis tivermos  $\sum H = 0$ , a distribuição de vazões estabelecida está correta e a rede é dita equilibrada.

**g)** Se, em pelo menos um dos anéis,  $\sum H \neq 0$ , que é a situação mais comum, a distribuição de vazão admitida será corrigida, somando-se (compensando-se) algebricamente a cada uma delas um valor  $\Delta Q$ , de modo que as novas vazões em cada trecho serão:

$$Q = Q_a + \Delta Q \quad (1.5) \quad \text{de modo a se atingir:}$$

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta H &= \Sigma K Q^n = \Sigma K [Q_a + \Delta Q]^n = \\ &= \Sigma K Q_a^n \left[ 1 + \frac{\Delta Q}{Q_a} \right]^n = 0 \quad (1.6) \end{aligned}$$

expressão que desenvolvida pelo binômio de Newton torna-se:

$$\Sigma K Q_a^n \left[ 1 + n \frac{\Delta Q}{Q_a} + \frac{n(n-1)}{2!} \left( \frac{\Delta Q}{Q_a} \right)^2 + \dots \right] = 0 \quad (1.7)$$

Supondo-se que  $\Delta Q$  é muito pequeno comparado a  $Q_a$ , isto é, que os valores supostos para as vazões são próximos dos valores reais, pode-se desprezar o terceiro termo da série e os seguintes, e daí:

$$\Sigma K Q_a^n = -n \Sigma K Q_a^{n-1} \Delta Q \quad (1.8)$$

e finalmente:

$$\Delta Q = \frac{\Sigma K Q_a^n}{n \Sigma \frac{K Q_a^n}{Q_a}} = \frac{\Sigma H_a}{n \Sigma \frac{H_a}{Q_a}} \quad (1.9)$$

Com as novas vazões obtidas em cada anel, recalculam-se as perdas de carga e prossegue-se com o método até que se obtenham, em todos os anéis, valores de  $\Delta Q$  pequenos ou nulos.

O número de aproximações sucessivas necessário depende, em grande parte, da margem de erro das estimativas iniciais das vazões e do porte da rede. Não é objetivo do cálculo chegar a um limite muito afinado, uma vez que os resultados obtidos não podem ser mais precisos que os dados básicos, os quais forçosamente serão com frequência algo incertos.

Com a rede equilibrada e conhecidas as cotas piezométricas nos pontos de alimentação, resultam imediatamente as cotas piezométricas e as pressões disponíveis nos diversos pontos da rede. Se estas pressões forem inadequadas, modifica-se o sistema, alterando ou a altura do reservatório ou os diâmetros de alguns trechos.

Tanto o problema de verificação quanto, principalmente, o problema de dimensionamento, por se utilizar de um método de aproximações sucessivas, são

extremamente laboriosos, exigindo o auxílio de um programa computacional para agilizar a análise de alternativas.

O Método de Hardy Cross normalmente é utilizado no dimensionamento dos anéis da rede principal ou tronco. Para a rede secundária pode-se dimensioná-la como uma rede ramificada ou projeta-se as malhas da rede principal englobando área que a rede secundária seja capaz de abastecê-la a partir das derivações das malhas.

Após esse estudo em hidráulica, tivemos o conhecimento sobre os métodos e como são realizados os cálculos em tubulações paralelas e com anéis, e a partir daí foi preciso conseguir uma maneira de passar toda a teoria em prática para o programa.

Tentando inserir o método de Hardy Cross no programa, foi percebido que o mesmo deveria identificar os anéis na tubulação, quando a mesma vinha sendo criada. Para isso criamos duas áreas no programa: A área já existente que seria apenas para o cálculo de tubulações lineares e outra área para o cálculo somente de redes hidráulicas, visto que para cada uma das áreas as funções e análises feitas pelo programa seriam diferentes uma da outra.

Então foi desenvolvido um menu para a criação de redes hidráulicas, esse menu traz as opções de uma nova rede, de salvar o projeto e de abrir uma rede já existente em arquivo. Quando selecionado, o menu Rede pede para que o usuário especifique as coordenadas das extremidades dos ramos da rede, com isso o usuário informa as extremidades e depois vai ligando-as com tubos formando a tubulação.

Primeiramente o usuário deve fornecer todas as extremidades da rede através de suas coordenadas cartesianas, com isso é atribuído um número a cada extremidade. Após a conclusão da inserção das extremidades o usuário deverá ligar as extremidades com ramos, para isso basta selecionar a opção Tubos no menu Rede e indicar em quais extremidades ele será ligado, e assim o usuário liga todas as extremidades indicadas por ele com tubos formando a rede hidráulica. A figura 1.7 mostra a tela principal do programa com uma rede hidráulica construída com suas extremidades e ramos.

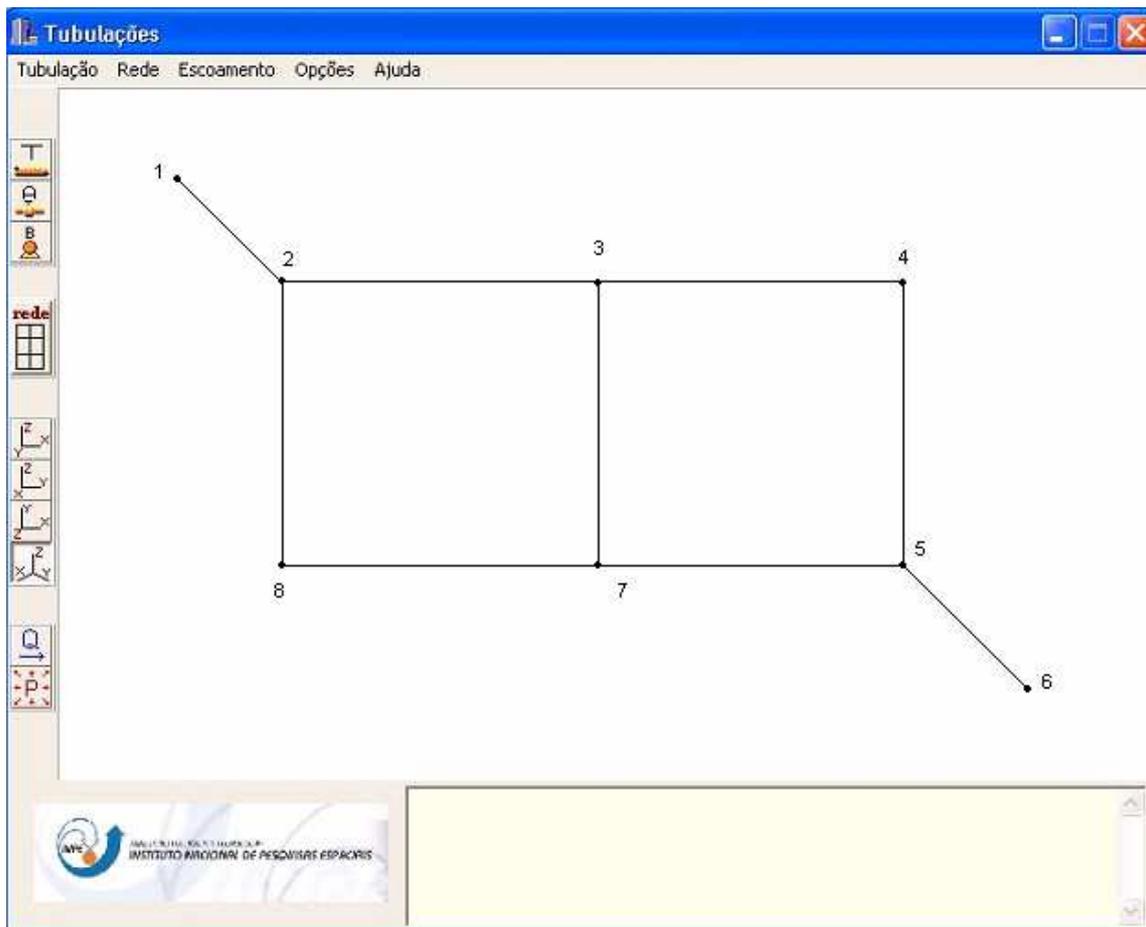


Figura 1.7

Concluída a parte de construção da rede o programa faz uma verificação em todas as extremidades para saber quais são nós. Essa verificação é feita de modo que as extremidades que contenham mais de 2 ramos são consideradas nós e as demais consideradas extremidades simples. Essa verificação é necessária para que o mesmo possa identificar os anéis na rede, isso porque para a realização do método de Hardy Cross deve-se conhecer os anéis e aplicá-lo em cada um. A verificação de anéis é feita através de um método lógico desenvolvido, verificando os nós.

Basicamente ele começa do primeiro nó e tem como objetivo voltar a esse nó percorrendo o menos caminho, após a detecção do primeiro nó ele segue para o próximo nó e guarda o ramo de ligação entre esses dois nós, após ele segue para o próximo nó, guardando o ramo de ligação e assim por diante até retornar ao primeiro nó, em alguns nós haverá dois caminhos a serem seguidos pelo método afinal os nós são ligados a 3 ramos ou mais,

então ele percorre todos os caminhos e acaba escolhendo como o caminho percorrido o menor dos caminhos, formando então o anel para a aplicação dos cálculos na tubulação.

Terminada a fase de verificações e construção da rede, o programa pede para que sejam inseridos dados de vazões nos ramos ou pressões nas extremidades, para então poder realizar os cálculos e fornecer os valores das propriedades do escoamento.

Dessa maneira, se reescreveu um software capaz de elaborar projetos de tubulações, sendo usado um encadeamento de tubo e acessório. E também o cálculo de bifurcações e anéis na tubulação. Por serem representados graficamente, tubos e acessórios tem simbologias diferentes, que constituem o desenho da tubulação na tela do programa. Para a formação do tubo são utilizadas as coordenadas x, y e z fornecidas pelo usuário. Já os acessórios têm ponto fixo. Ao término de cada tubo, um acessório é inserido. São considerados acessórios: tês, curvas, cotovelos, junções, contrações, alargamentos, válvulas, bombas e placa de orifício.

Tanto para Redes quanto para Tubulações lineares temos os cálculos de propriedades dos fluídos e tubos.

### **Cálculo das propriedades dos fluídos e tubos**

Para que fossem feitos os cálculos das propriedades dos tubos e fluídos pelo programa, foram colocadas listas, contendo valores característicos de cada fluído e material. Além disso, foram utilizadas varias equações de mecânica dos fluídos, e hidráulica. Serão descritos a seguir quais métodos e equações foram utilizadas para os cálculos do programa.

**Comprimento do tubo (L):** para o calculo do comprimento do tubo, foi usada a equação que calcula o módulo de um vetor, uma vez que foram fornecidas pelo usuário as coordenadas iniciais e finais do tubo.

$$L = \sqrt{(x_F - x_i)^2 + (y_F - y_i)^2 + (z_F - z_i)^2}$$

$x_i$  = coordenada inicial no eixo x.

$x_F$  = coordenada final no eixo x.

$y_i$  = coordenada inicial no eixo y.

$y_F$  = coordenada final no eixo y.

$z_i$  = coordenada inicial no eixo z.

$z_F$  = coordenada final no eixo z.

**Rugosidade ( $\epsilon$ ):** a rugosidade absoluta equivalente é diferente em cada tipo de material. No programa continuam inseridos 30 materiais com suas respectivas rugosidades. Segue uma tabela de valores da rugosidade absoluta equivalente das opções de materiais existentes no programa.

MATERIAL	RUGOSIDADE ABSOLUTA EQUIVALENTE ( $\epsilon$ ) (mm)
Aço comercial novo	0,045
Aço laminado novo	0,04 a 0,010
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 novo	0,25 a 0,50
Ferro fundido com leve oxidação	0,30
Ferro fundido centrifugado	0,05

Ferro fundido em uso com cimento centrifugado	0,10
Ferro fundido em 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, R.M. – “Hidráulica Básica” – 2ª edição

Para os materiais que apresentam uma faixa de valores para rugosidade absoluta como é o caso do PVC, Cobre, Latão entre outros, foi atribuído o maior valor da faixa para os cálculos.

A lista contendo os nomes dos materiais e suas respectivas rugosidades foi colocada em um arquivo do bloco de notas chamado “Materiais.txt”. O software lê esse arquivo.txt, e insere no campo da janela de dados do tubo, a lista contendo os materiais disponíveis para a criação dos tubos. Quando se escolhe algum tipo de material, automaticamente já se informa ao programa qual rugosidade absoluta deve ser usada para os cálculos. Com isso, torna-se mais fácil a atualização do programa, uma vez que para adicionar novas rugosidades, é apenas necessário abrir o arquivo no bloco de notas, e colocar o nome e a rugosidade absoluta do material em mm.

No arquivo que contém a lista dos materiais, o primeiro número corresponde à quantidade de materiais desse arquivo, assim, ao se adicionar novos materiais, é necessário mudar também o número que corresponde à quantidade de materiais do arquivo, pois é através da quantidade mencionada acima que se determina o número de vezes que a função deverá escrever o nome dos materiais no campo de dados.

Com o valor da rugosidade absoluta equivalente, coletada da lista de materiais, foi possível determinar a rugosidade relativa através da seguinte equação:

$$\mathbf{Rug}_{\text{Rel}} = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}}{\mathbf{d}} \quad \text{onde } d \text{ corresponde ao diâmetro do tubo (m).}$$

Assim como existem á disposição do usuário 30 tipos de materiais para a elaboração de diferentes tipos de tubulações, houve também uma preocupação em disponibilizar diferentes fluídos para simular diversas situações de escoamento.

**Coefficiente de viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) e massa específica ( $\gamma$ ):** Assim como nos materiais, onde existe uma rugosidade absoluta para cada tipo, os fluidos também apresentam propriedades características, é o caso do coeficiente de viscosidade dinâmica, e da massa específica. No programa foram inseridos 6 tipos de fluidos, Segue a tabela contendo os fluídos presentes no programa e seus respectivos, coeficiente de viscosidade dinâmica e massa específica.

FLUÍDO	COEFICIENTE DE VISCOSIDADE DINÂMICA ( $\mu$ ) (N.s /m <sup>2</sup> )	DE MASSA ESPECÍFICA ( $\rho$ ) (Kg/m <sup>3</sup> )
Água	0,00112	999
Álcool Etflico	0,00119	789
Gasolina	0,00031	680
Mercúrio	0,00157	13600
Óleo SAE 30	0,038	912

Fonte: YOUNG. D. F – “Fundamentos de Mecânica dos Fluídos” volume 2.

O mesmo procedimento usado para a lista de materiais contendo suas respectivas rugosidades foi utilizado para a lista dos fluídos também, caso queira se fazer alguma alteração na lista de fluídos o procedimento é idêntico ao da lista de materiais.

**Velocidade do fluido no tubo e acessório (v):** a velocidade no tubo é encontrada através da equação de vazão:

$$Q = v \times A$$

Sendo:  $Q =$  vazão da tubulação ( $m^3/s$ ).

$v =$  velocidade do fluido ( $m/s$ ).

$A =$  Área de seção circular do tubo ( $m^2$ ).

Podemos trabalhar essa equação a fim de se encontrar: velocidade do fluido, a vazão da tubulação ou a área de seção circular do tubo. Para encontrarmos a velocidade do fluido a equação é escrita da seguinte forma:

$$v = \frac{(Q \times 4)}{(\pi \times d^2)}$$

**Número de Reynolds (Rey):** Numero adimensional, que mede a razão entre as forças de inércia de um elemento fluido e os efeitos viscosos no elemento. É importante o calculo desse adimensional, quando forem relevantes, tanto forças de inércia, quanto forças viscosas, Portanto está incluído ao programa também o cálculo do numero de Reynolds, que é fornecido pela equação:

$$Rey = \frac{(\rho \times v \times d)}{\mu}$$

**Fator de atrito no tubo (f):** Com os valores de Rugosidade Absoluta Equivalente e numero de Reynolds, foi possível determinar o fator de atrito no tubo, através da fórmula de Swamee:

$$f = \left\{ \left( \frac{64}{Rey} \right)^8 + 9,5 * \left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7 * d} + \frac{5,74}{Rey^{0,9}} \right) - \left( \frac{2500}{Rey} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125}$$

**Perda de carga no tubo ( $\Delta h$ ):** Para o cálculo da perda de carga ao longo do tubo, utilizou-se a fórmula de Darcy, também conhecida como fórmula de Fanning, é a equação mais comum para esse tipo de cálculo em tubulações industriais:

$$\Delta h = f \times \frac{L}{d} \times \frac{v^2}{2 \times g}$$

**Diferença de pressão no tubo:** A equação que nos fornece a diferença de pressão no tubo é a equação de Bernoulli em uma de suas aplicações:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 \times g} + H_B = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 \times g} + H_P + H_T$$

$p_1$  e  $p_2$  = pressões inicial e final;

$\gamma = \rho \times g$ ;

Podemos trabalhar a equação de Bernoulli de forma a simular uma situação bastante comum, onde não possuímos bomba, nem turbina na tubulação. Portanto devemos considerar  $H_B$  e  $H_T$  iguais a 0, velocidade inicial e final iguais,  $v_1 = v_2$ , e o diâmetro no tubo constante. Assim, obtêm-se a seguinte equação:

$$p_1 - p_2 = \gamma \times (z_2 - z_1 + H_P)$$

$H_P$  = soma das perdas de carga;

## Propriedades dos acessórios

A tubulação gerada pelo programa deve ser constituída de tubos, acessórios e bombas, portanto calcularmos somente as propriedades dos tubos não nos gera resultados corretos, é preciso também que sejam colocadas ao programa as propriedades dos acessórios e bombas existentes no mercado.

**Coefficiente de perda de carga localizada(K):** é um coeficiente adimensional, que depende da geometria do acessório, número de Reynolds, rugosidade das paredes e, em alguns casos, das condições do escoamento, portanto cada acessório apresenta um

coeficiente específico. Foi criado então mais um arquivo.txt para armazenar a lista dos acessórios e seus respectivos coeficientes de perda de carga localizada. Segue uma tabela contendo esses valores para cada tipo de acessório.

ACESSÓRIOS	COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA LOCALIZADA (K)
Curva 90°, raio normal, flangeada	0,3
Curva 90°, raio normal, rosqueada	1,5
Curva 90°, raio longo, flangeada	0,2
Curva 90°, raio longo, rosqueada	0,7
Curva 45°, raio longo, flangeada	0,2
Curva 45°, raio normal	0,4
União Rosqueada	0,08
União com cola	0
Válvula globo	10
Válvula gaveta	0,15
Válvula de retenção	2
Válvula esfera	0,05

Fonte: YOUNG. D. F – “Fundamentos de Mecânica dos Fluídos” volume 2.

Assim como nos arquivos de materiais, e de fluidos, o procedimento de armazenamento dos valores de (K) para acessórios são os mesmos. Caso o usuário queira alterar a lista de acessórios, deve fazer o mesmo procedimento dos arquivos já citados, materiais e fluidos, não esquecendo de alterar o primeiro número da lista, que indica a quantidade de acessórios na lista. Ao iniciar o programa, esse arquivo é lido, de forma que são atribuídos às classes: o nome dos acessórios e os seus coeficientes.

O cálculo da perda de carga no acessório é feito através da equação geral das perdas de cargas localizadas :

$$\Delta h = k \times \frac{v^2}{2 \times g}$$

Os cálculos das propriedades dos tubos, fluídos, acessórios e bombas são o ponto principal do programa, mas para que o software consiga calcular e obter todas essas propriedades é preciso que o usuário ao fim da construção da tubulação, forneça alguns parâmetros ao programa, foram colocadas duas opções para o fornecimento desses parâmetros, o usuário poderá optar em fornecer ao programa a vazão e a pressão inicial na tubulação, ou fornecer pressão inicial e pressão final na tubulação.

Fornecidas vazão e pressão inicial na tubulação serão calculados:

- *Velocidade nos tubos e acessórios.*
- *Número de Reynolds.*
- *Fator de atrito nos tubos.*
- *Perda de carga localizada e total.*
- *Diferença de pressão.*

Fornecidas as pressões inicial e final na tubulação serão calculados:

- *Velocidade nos tubos e acessórios.*
- *Vazão na tubulação.*
- *Número de Reynolds.*
- *Fator de atrito nos tubos.*
- *Perda de carga localizada e total.*

Apesar de serem calculadas as mesmas propriedades da tubulação, os procedimentos dos cálculos são feitos de maneira diferente para as opções de dados fornecidos.

## **Procedimento dos cálculos fornecendo vazão e pressão inicial na tubulação:**

Para os tubos: primeiramente a perda de carga total na tubulação deve ser 0, o valor da pressão inicial é atribuído à pressão máxima e mínima na tubulação.

Após isso, são calculados para cada tubo: a velocidade, o número de Reynolds, o fator de atrito e perda de carga. O valor encontrado para a perda de carga é somado à perda de carga total.

Com isso calcula-se a diferença de pressão no tubo, encontrando assim a sua pressão final. Esse valor encontrado é comparado à pressão máxima e mínima, sendo trocada se for maior ou menor (respectivamente) aos valores anteriores.

Para os acessórios: é necessário inicialmente identificar o tipo de acessório, após, calcula-se a velocidade no acessório, a perda de carga localizada. O valor encontrado é adicionado à perda de carga total.

Terminado os cálculos de todos os componentes da tubulação, os resultados são exibidos em uma caixa de texto informativa na página principal do programa.

## **Procedimento dos cálculos fornecendo pressão inicial e pressão final na tubulação:**

O cálculo através do fornecimento da diferença de pressão é, feito de maneira um pouco mais complexa, para isso foi idealizado um modelo numérico iterativo que leva em conta as características de modelagem dos termos da equação de Bernoulli.

**Modelo numérico iterativo:** Quando são fornecidas apenas, a diferença de pressão na tubulação, para efeito dos cálculos não existem parâmetros para obtermos um valor de velocidade então é necessário que se atribua um valor, seja qual for, para a velocidade. No software atribuiu-se o valor de 3m/s. Com essa velocidade, encontra-se a vazão:

$$Q = \frac{(v \times \pi \times d^2)}{4}$$

Deve-se calcular, um fator requerido que é, relacionado com a diferença de pressão e a diferença de cotas, um fator que serve como referencia para obtermos a vazão correta.. Assim, temos:

$$\mathbf{Fator}_{\text{Requerido}} = \frac{(p_1 - p_2)}{\gamma} + z_i - z_f$$

A partir da vazão atribuída através do valor de velocidade 3m/s, é utilizado o mesmo procedimento para o cálculo fornecendo vazão e pressão inicial. Com isso, obtivemos novos valores para pressões, e com esses novos valores, um novo fator deve ser calculado, da mesma maneira que o fator requerido, só que serão utilizados os resultados obtidos nos cálculos.

Com isso encontramos dois fatores, um “fator requerido”, referencia, e um “fator obtido”, que expõe os valores atuais do cálculo.

Após, deve haver uma verificação para saber se o valor absoluto de (Fator obtido/ Fator Requerido) – 1 é menor que uma certa precisão, nesse caso foi usado um valor para a precisão de 0,01. Se isso for verdadeiro, a vazão atribuída é a correta, e todos os resultados serão exibidos. Se for falso, atribui-se um novo valor para a vazão, que será:

$$Q = Q_{\text{anterior}} \times \sqrt{\frac{\mathbf{Fator}_{\text{Requerido}}}{\mathbf{Fator}_{\text{Obtido}}}}$$

Esse processo será repetido até que se encontre a vazão correta, e assim exibir os resultados encontrados na caixa de mensagens na tela principal do programa.

## **Descrição da parte gráfica do programa**

A parte gráfica do programa simula um CAD, reproduz o desenho da tubulação. Foram criadas funções que desenharam a tubulação de acordo com as coordenadas do tubo. Para a visualização da tubulação assim como na versão anterior, o programa disponibiliza 4 vistas: superior, frontal, lateral e isométrica.

Para a visualização superior da tubulação, são usadas apenas as coordenadas x e y para desenhar os tubos, para a vista frontal as coordenadas x e z , para a lateral as

coordenadas y e z. Já para a vista isométrica são usadas todas as coordenadas (x, y e z) para desenhar os tubos e em particular nessa vista é necessário o cálculo de duas componentes, que foram chamadas de u e v.

As componentes, u e v utilizadas para o desenho da vista em perspectiva isométrica são calculadas a partir das equações:

$$u = -x \times \cos 30^\circ + y \times \cos 30^\circ;$$

$$v = z - x \times \sin 30^\circ - y \times \sin 30^\circ;$$

**Escala:** Para a reprodução da figura da tubulação na tela do programa, deve haver um cálculo de escala do desenho, com a finalidade de fazer com que a tubulação ocupe sempre toda a janela de imagem, deixando uma borda de 10 pixels em cada lado da imagem. A tela da imagem tem 660 horizontal x 420 vertical (pixels), a área efetiva do desenho vai ocupar 640 horizontal x 400 vertical.

O procedimento do cálculo de escalas se manteve, a cada entrada de coordenadas do tubo, são calculadas as componentes: u e v, e assim então são comparadas todas as coordenadas com os valores máximos e mínimos, definindo assim, um máximo e mínimo para cada coordenada.

Para determinar a escala do desenho foi necessário encontrar a diferença entre o valor máximo e mínimo, e o ponto médio de cada coordenada. O ponto médio foi definido com a finalidade de deixar que o desenho sempre ocupasse a área central da janela de imagem. Desta forma, temos como exemplo para a coordenada x:

$$dx = x_{max} - x_{min}$$
$$x_{med} = \frac{(x_{max} + x_{min})}{2}$$

Para cada vista do desenho disponível no programa, foi feito um cálculo de escala, como exemplo será mostrado o método usado para a **vista superior**: Primeiro foi verificado se o dx e o dy eram menores que uma certa precisão, nesse caso foi usado o valor de 0,001. Em caso afirmativo, o valor da escala fica sendo 1; e em caso negativo, compara-se os valores de  $\frac{dx}{640}$  e  $\frac{dy}{400}$ , a escala fica sendo o inverso dessa fração para o maior valor.

Quando se define uma vista, é necessário encontrar as coordenadas em 2D. No caso da vista superior encontra-se as coordenadas (x, y) na janela da imagem de cada ponto do tubo, para desenhar a tubulação.

$$x_{ini} = (x_i - x_{med}) \times ESC + 330$$

$$y_{ini} = (y_i - y_{med}) \times ESC + 210$$

$$x_{fim} = (x_f - x_{med}) \times ESC + 330$$

$$y_{fim} = (y_f - y_{med}) \times ESC + 210$$

## CAPITULO 4

# RESULTADOS OBTIDOS

Nesse período de aprendizagem e pesquisa conseguimos através da aplicação dos métodos citados anteriormente, obter um programa para a elaboração de projetos de tubulações, constituídas de tubos, acessórios (curvas, cotovelos, junções, contração, alargamento, válvulas) e bombas, e que disponibiliza a inserção de bifurcações e a criação de redes hidráulica, todas construídas graficamente.

A finalidade de se elaborar tais projetos de tubulação no programa, é encontrar os parâmetros de mecânica dos fluídos em um escoamento, entre eles: velocidade do fluido na tubulação ou acessório, fator de atrito nos tubos, perda de carga localizada dos tubos e acessórios, vazão da tubulação, perda de carga total, número de Reynolds, pressão inicial, pressão final, pressão máxima e mínima na tubulação, parâmetros calculados de acordo com as condições fornecidas pelo usuário.

Entre as condições fornecidas pelo usuário temos: a escolha do fluido do escoamento, a escolha dos materiais utilizados para a construção da tubulação, a inserção de bombas ou acessórios na mesma, e a forma de cálculo, escolhendo a entrada de dados entre vazão e pressão inicial ou pressão inicial e pressão final.

Houve também a divisão entre o projeto de tubulação linear e o projeto de tubulação em redes hidráulicas, onde implementamos ao programa um sistema de cálculo com base no método de Hardy Cross para o desenvolvimento de projetos com redes hidráulicas.

Outra interatividade do usuário é a escolha da vista do desenho (superior, frontal, lateral e isométrica), o que não altera em nada o resultado dos cálculos. Todas essas intervenções do usuário ao programa estão disponíveis através de uma interface gráfica, que agiliza e simplifica o trabalho do mesmo, além da criação do guia de ajuda rápida ao usuário que disponibiliza um guia no menu principal com todas as informações das funções do programa, auxiliando o mesmo a manusear corretamente as operações do software.

## CONCLUSÃO

Com todos os estudos e aplicações da linguagem de programação C++ e hidráulica, mais uma versão do software foi realizada, ferramenta auxiliar para a elaboração de projetos de tubulações, com o intuito de automatizar os cálculos para a obtenção de dados necessários para a implementação desses projetos. O projeto se encontra em um patamar aceitável para projetos de tubulações mas novas versões e novos recursos atribuídos ao mesmo são sempre necessárias. Por isso espera-se que possa haver a continuidade do trabalho buscando sempre tentar abranger de forma completa as propriedades de mecânica dos fluidos existentes em um escoamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. Wikipédia, a enciclopédia livre. <http://pt.wikipedia.org>
2. Andrade, L. (Discente-Autor/Mest.Acadêmico); Carvalho, J de A. (Docente): Análise da equação de Swamee-Jain para cálculo do fator de atrito; Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental; 2001; UFPB;
3. TELLES, P. C. S. – “Tubulações Industriais – Cálculo” – 8ª edição – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1994.
4. TELLES, P. C. S. – “Tubulações Industriais – Materiais, Projeto, Montagem” – 8ª edição – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1994.
5. PORTO, R. M. – “Hidráulica Básica” – 2ª edição – São Carlos: EESC-USP, 1999.
6. MUNSON, B. R; YOUNG, D. F; OKIISHI, T. H. – “Fundamentos da Mecânica dos Fluídos – tradução da 4ª Ed. americana” – Editora Edgard Blücher LTDA, 2004.
7. DEWHURST, S. C; STARK, K. T. – “Programando em C++” – Rio de Janeiro, Campus 1990.
8. WIENER, R; PENSON, L. J. – “Programação orientada a objeto e C++” – São Paulo, Makron, MC Graw, 1991.
9. [www.tigre.com.br](http://www.tigre.com.br)
10. [www.dicasbcb.com.br](http://www.dicasbcb.com.br)

11. Leal, A. F. ; Gomes, H. P. : Utilização da Metodologia de Granados, para a Otimização de Redes Hidráulicas Malhadas; Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande 1997;